

月環境における放射線量の評価

The Evaluation of Radiation Dose on the Moon

2012年2月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
物理学及応用物理学専攻 宇宙放射線物理学研究

早津 佳那子

序文

月の探査・開発を主目的とした宇宙計画が進行されつつあるにもかかわらず、放射線環境や線量の評価といった報告は国内からは殆ど皆無である。世界的に見ても、月における線量評価はアポロ探査の時代から実施されてきたが、その後、月の線量についての進展は殆ど見られないのが現状であり、今後の大きな課題である。一方、高精度な宇宙線観測データが近年得られるようになり、また、アポロ探査時代に比べて線量の定義そのものも改良が進んでいるなかで、月有人探査時代の幕開けを前に、より高精度な月の放射線環境の評価が急務となっている。こうした背景を下に、本研究では近年の高精度な宇宙線観測結果と最新の線量定義を用いて月面の放射線環境の線量評価を行っている。また、月の線量評価を通して浮き彫りとなった問題点の指摘や改善点をまとめ、将来の月探査に向けた線量計測の研究課題を提示した。ここから導かれる結果は長期にわたり月に滞在する月面居住者（作業従事者）の線量管理に貢献でき、今後の日本の宇宙開発の促進につながる点で大きな意義を持つ。

第1章「序論」では研究の背景と線量の定義について詳細を記すとともに、地球上の線量と宇宙空間における線量との違いに注目して、本研究の目標を明確にした。線量定義に関しては、線量計算に関わる荷重係数についてこれまでの変遷を振り返り、近年勧告された最新の換算係数を導入した。地球の線量としては、一般の公衆被曝や医療に関わる線量についてまとめると同時に、国際放射線防護委員会（ICRP）で定められた有事の際の防護基準や大きな線量を一度に受けた場合に発生する急性障害の危険性についても言及した。宇宙空間における線量としては国際宇宙ステーションの線量計測の実態や将来の火星探査に向けた人体に対する線量シミュレーションについて先行研究報告をまとめ、月の放射線環境との違いと放射線評価の問題点を指摘した。

第2章「月の放射線環境モデルと線量計算条件」では、最新の宇宙線観測の結果について詳述し、中性子やガンマ線を含めた線量評価を行うために、新しい月の放射線環境モデルを提示すると共に、その重要性を述べた。また、本論文では線量の定義として実用量である周辺線量当量と防護量である実効線量当量、及び実効線量を選び、その計算条件について第2章にまとめた。

第3章「月の放射線量計算結果」では、前章でまとめた線量定義と手法に従って

月の放射線量を計算した結果について示した。銀河宇宙線の年間線量の計算から、太陽活動に伴う月面の線量差が非常に大きいこと、二次粒子線量の計算から、月の海と高地の線量差は実効線量で 4.4 mSv/yr であること、太陽粒子線の線量計算から、大規模フレアに起因する月面線量は時として年間の銀河宇宙線月面線量を大きく上回る可能性があること、遮蔽計算から、太陽粒子線に対しては 10 g/cm^2 程度の薄いアルミニウムシールドで容易に低減できることを明らかにした。また、銀河宇宙線に対しては 500 g/cm^2 の厚い月レゴリスシールドが有効であることも指摘した。年間線量のワーストケースは実効線量当量の定義に基づく線量で、太陽活動極小期の月の海領域における線量値で、約 880 mSv/yr であった。太陽粒子線計算のワーストケースは 1972 年イベントの周辺線量当量値で、遮蔽を行わない場合の線量値は致死量に達することを示した。

第 4 章「月の放射線環境の考察」では、今後の有人月探査に向けた上述の計算結果に対する考察と問題提起をまとめた。月探査では、これまであまり注目されてこなかった二次中性子線量や銀河宇宙線中の重粒子核成分も、大部分を占める陽子による線量の評価と同様に重要であることが本研究で明らかになった。さらに、国際宇宙ステーションの宇宙飛行士の生涯線量制限と本計算の結果から、今後の有人月探査の開始時期に関する提言を行った。すなわち、太陽活動極小期は大規模フレアの数が少なく致死量に達するような線量を受けにくいことから、長期にわたる月基地の建設は、この時期に開始すべきである。また、月の溶岩チューブなど自然にある地形を活用することで銀河宇宙線の防護も十分可能であることを示した。

第 5 章「総括と今後の展望」では本研究によって得られた知見を総合し、且つ、今後の宇宙有人探査に向けたきめ細かな線量評価や線量測定の研究に関する今後の展望について述べた。

なお、本論文で使われる日本語の専門用語は、それぞれに対応する英語の専門用語から訳出されたものである。参考のため、それら専門用語の英語での詳細な定義、意味、単位などを Appendix に記した。

目 次

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 第 1 章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 研究背景 | 2 |
| 1.2 | 線量定義 | 3 |
| 1.2.1 | 物質に対する線量 | 3 |
| 1.2.2 | 人体に対する線量 | 5 |
| 1.3 | 地上の線量 | 10 |
| 1.3.1 | 平常時の線量 | 10 |
| 1.3.2 | 有事の際の線量 | 15 |
| 1.4 | 宇宙空間における線量 | 20 |
| 1.4.1 | 国際宇宙ステーションにおける線量計測 | 20 |
| 1.4.2 | 月での線量計測と過去のシミュレーション結果 | 21 |
| 1.4.3 | 火星有人探査に向けた放射線管理 | 25 |
| 1.4.4 | その他の有人惑星探査に向けた放射線管理 | 25 |
| 1.5 | 本研究の目的 | 26 |
| | 参考文献 | 31 |
| 第 2 章 | 月の放射線環境モデルと線量計算条件 | 35 |
| 2.1 | 銀河宇宙線 | 36 |
| 2.2 | 太陽粒子線 | 37 |
| 2.3 | その他の宇宙線一次成分 | 42 |
| 2.4 | 二次中性子とガンマ線 | 45 |
| 2.5 | 線量換算係数 | 55 |
| 2.6 | 計算手法 | 62 |
| | 参考文献 | 67 |
| 第 3 章 | 月の放射線量計算結果 | 73 |
| 3.1 | 銀河宇宙線に起因する月表面線量 | 74 |
| 3.1.1 | 周辺線量当量 | 74 |
| 3.1.2 | 実効線量当量 | 76 |
| 3.1.3 | 実効線量 | 78 |

| | |
|--|------------|
| 3.2 太陽粒子線に起因する月表面線量 | 80 |
| 3.2.1 周辺線量当量 | 80 |
| 3.2.2 実効線量当量 | 82 |
| 3.2.3 実効線量 | 85 |
| 3.3 太陽粒子線に対するアルミの遮蔽効果 | 88 |
| 3.4 銀河宇宙線に対する月レゴリスの遮蔽効果 | 92 |
| 参考文献 | 95 |
| 第4章 月の放射線環境の考察 | 97 |
| 4.1 中性子成分の線量寄与に関するまとめ | 98 |
| 4.2 宇宙線重粒子成分の線量寄与に関するまとめ | 101 |
| 4.3 各線量定義のメリットとデメリット | 105 |
| 4.4 線量制限との比較と有人月探査開始時期に関する提言 | 113 |
| 参考文献 | 115 |
| 第5章 総括と今後の展望 | 117 |
| 5.1 まとめ | 118 |
| 5.2 今後の展望 | 119 |
| 参考文献 | 123 |
| Appendix | 125 |
| 謝辞 | 131 |
| 研究業績 | 133 |

第1章 序論

本研究の背景とその目的を示す。世界的に月・惑星探査に大きな注目が集まる今、将来行われるであろう有人月探査に対する期待が高まっている。月は地球に最も近い天体である。しかしその放射線環境は地球とは全く異なりたいへん過酷なものである。本章では、地球上の線量と宇宙空間における線量との違いに注目して、月の放射線環境を評価するための背景をまとめる。宇宙空間における線量としては国際宇宙ステーションの線量計測の実態や将来の火星探査に向けた人体に対する線量シミュレーションについて過去の先行研究の報告をまとめ、月の放射線環境との違いを議論する。

1.1 研究背景

これまで、アポロによる月の探査を除いて、有人宇宙飛行は地球近傍に制限されてきた。現在でも低軌道高度の国際宇宙ステーションに宇宙飛行士が滞在し、研究活動を行う程度である。しかしながら、今後計画されうる将来の有人宇宙探査は地球近傍に制限されるものではない。すでに各国が総力を挙げて、いくつかの無人探査機を月や火星に送り、それぞれの惑星・衛星での地質探査や物理探査を積極的に行っている。月の無人探査衛星による遠隔探査は近年特に活発化しており、アポロやルナ探査の時代を彷彿とさせるような月探査競争が行われている。

日本も2007年9月にSELenological and ENgineering Explorer (SELENE) 計画の1号機が月に送られ話題になった。月にちなんで「かぐや」という愛称で親しまれたこの無人探査機は、14の科学観測機器とハイビジョンカメラ (HDTV) を搭載しており、これはアポロ、ルナ探査に次ぐ大規模な月探査となった [1]。これに次いで、中国、インド、アメリカが次々に大規模な無人探査衛星を月に送り、現在に至るまで数々の成果を報告している [2, 3, 4]。さらに、各国は次なる月探査の構想を発表しており [5, 6, 7]、月をめぐる宇宙探査競争はまだ加速を続ける見込みである。これらの状況から察するに、近い将来月が有人探査のターゲットとなることは疑う余地はなく、月有人探査にそなえ、月基地を建設する構想も現実味を帯びてきている [8]。すでに有人月探査の開始へのカウントダウンが始まっていると言っても過言ではない。このような状況の中で、長期間の有人探査に耐えうる安全性の確保は最優先課題である。

わが国の宇宙開発においては、先に述べた月探査衛星「かぐや」が成功を収め、今後はその後続機 SELENE-II による更なる月面の無人探査が計画されている。さらに2009年3月、政府の宇宙開発戦略本部専門調査会において2025年から2030年にかけてロボットと連動した有人月探査を実施する計画が示された。

月は地球に最も近い天体ではあるが、その放射線環境は地球とは大きく異なる。月には地球のような厚い大気や磁場が存在しないため、銀河宇宙線や太陽高エネルギー粒子線が月面に直接降り注ぐ。それらの粒子群は月地殻の表層物質と核相互作用することで中性子などの二次粒子を発生させる。これらの粒子群により人体が受ける線量は、地球で被曝する平均被曝量をはるかに上回る。このような過酷な放射線環境に晒されながら船外活動をする宇宙飛行士などの作業従事者の安全性の見積もりに関して国内では特に報告はされていない。月の線量評価と月作業員に対する防護、遮蔽について日本は他国に先駆けて、そのガイドラインや方針を示していくことが重要である。

日本でも月の探査・開発を主目的とした宇宙計画が進行されつつあるにもかかわらず、放射線環境や線量の評価といった報告は国内からは殆ど皆無である。世界的に見ると、月における線量評価はアポロ探査の時代から行われてきたが、そ

の多くが過去の宇宙線観測に基づく精度の低いものであった。近年、高精度な宇宙線観測結果が発表され、さらに放射線粒子の発生と輸送を取り扱うモンテカルロコードもアポロ探査時代に比べ大きく進歩している。今、新たな月有人探査時代の幕開けを前に、より高精度な月の放射線環境評価が急務となっている。

放射線及び放射性物質に対する人体への影響は後節にまとめるが、被曝線量が大きい場合は急性障害を引き起こす危険性があるため、放射線の防護は大変重要である。特に宇宙探査に携わる宇宙飛行士たちの被曝線量率は地上の公衆線量や放射線業務従事者の線量よりも一般に大きい。宇宙放射線はその起源によっていくつかの種類があるが、それらはいずれも高エネルギーであり、そのほとんどは荷電粒子である。地球とは異なる放射線環境における放射線の防護も地球と同様に重要であるが、宇宙放射線は自然放射線であるため、従来は法規制の対象とは考えられてこなかった。現在でも宇宙放射線防護については色々な考え方があり、まだ国際的にも合意が得られていないのが現状である。米国原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission; NRC) は、宇宙飛行士の従事期間を通常の放射線作業従事者のように 50 年間の作業を想定せず、10 年間としてガイドラインを作成している。宇宙飛行士の防護基準については、米国では米国放射線防護測定審議会 (National Council of Radiation Protection and Measurements; NCRP) と米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration; NASA) が、国内では宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan; NASDA) の有人サポート委員会が中心となって、放射線防護に関する指針について検討している。しかし現在に至るまで、宇宙における放射線防護の統一されたガイドラインはなく、今後の月・惑星開発を国際協力の下で安全に行なうために、宇宙放射線の防護に対する統一的な指針が必要であると考えられる。

1.2 線量定義

1.2.1 物質に対する線量

放射線による被曝の定量的な評価のために線量が定義されている。歴史的な変遷の中でより高精度に線量を評価するために線量の定義は枝分かれし、改定が繰り返されてきた。本研究ではとくに人体に対する線量を評価する。したがって、人体に対する線量定義を適用する。しかし人体に対する定義も多種多様である。現状では長期にわたる宇宙探査の際の線量評価をどういった線量定義に基づいて評価するかという大前提の課題すらクリアされていない。どの線量定義を用いて線量評価し、ミッションを組み立てるかという選択はそのミッション要求に依存するところが大きいかもしれない。宇宙環境という特殊な放射線環境でも適用でき

る現状で最も適した線量定義を探すべく、今回は3つの線量定義に基づいてそれぞれ計算し、それらの値を比較することとする。

まずは、どの線量定義にも共通する概念として吸収線量 D を導入する。吸収線量は物理量としての線量定義の中でも最も基本的な概念であり、人体だけでなく物質全てに寄与する線量を求める基準の値である。単位はSI単位系で J/kg であり、人体に対する線量 (Sv) と区別するために、これは特別にグレイ (Gy) と表記される。

吸収線量 D はその単位からも分かるように、ある物質の単位質量 dm に付与される平均エネルギー $d\epsilon$ で式 (1.1) のように定義される [9]。

$$D = dm/d\epsilon \quad (1.1)$$

以下で導入する人体に対する線量も基本的にはこの吸収線量が前提となっている。

吸収線量に関して、線量測定分野で大きく注目されているのが線エネルギー付与 (linear energy transfer; LET) の概念である。LET は荷電粒子がターゲット物質中を通過した際に、その飛跡に沿って付与される局所的なエネルギー量であり、その単位は $\text{keV}/\mu\text{m}$ で表わされる。線量測定は一般的にこの LET が測定されることが多く、ターゲット物質を限定しない定義であることから人体に付与される線量だけでなく、放射線損傷の恐れがあるような宇宙観測機器についても適用可能である。下記で導入する線質係数 Q は人体線量を評価する際に欠かせない係数の一つであるが、これも LET の関数として定義されている。

もし仮に、放射線に対する生物学的効果が各組織や臓器に付与されたエネルギーの総量と完全に比例関係にあるとするならば、吸収線量 D が効果的に放射線障害を評価する定義量となりえただろう。しかし、実際はそう簡単ではない。生物効果は単位質量あたりの放射線のエネルギー付与にのみ依存する量でないのである。同じ吸収線量でも LET が大きければ生物学的効果はそれに伴って変わる。つまり生物細胞を効果的に痛めつけ、がんを引き起こすような LET を持つ放射線は、それだけ人体に対する線量が高く評価されるべきである。その LET 値はただ大きければよいというわけではない。大きすぎる LET 値は細胞を完全に殺してしまう可能性があり、結果としてがん細胞として増殖させるプロセスに結び付かないからである。人体細胞ががん細胞となり無限に増殖を続けていくプロセスにはいまだ謎の残るところが多く、人体線量の評価には大きな曖昧さが残る。しかし、数々の動物実験を経ることで線量評価の係数は近年大きくその精度を高めてきていると言われている。このような放射線種類ごとの生物効果の違いを評価すべく、線質係数 Q や放射線荷重係数 w_R が定義されてきた。地球上における評価では線質係数 Q は放射線荷重係数 w_R の良い近似値として扱われている。しかし、特殊な放射線環境の月において、その関係が成り立つか否かについては未だ確証はない。

1.2.2 人体に対する線量

人体に対する線量は大きく二つの概念で定量化され評価されている。国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU) による実用量の概念と国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection; ICRP) による防護量の概念である。防護量は全身の組織・臓器における被曝線量を重みづけ平均で評価することで全身の線量を定量化できる計算量である。実用量は環境モニタリングのために考案された概念で、実際の計測にかかる量として定義されている。本研究では、実用量の一つである周辺線量当量と、防護量である実効線量当量、実効線量の定義にしたがって月の放射線環境を定量的に評価する。特に実効線量は地球上の線量評価では現在最も一般的な定義として用いられる。

モニタリングのための実用量としてはいくつかの定義がある。2001年4月施行の国内法令により、線量の測定に係る量として1 cm 線量当量 $H_{1\text{cm}}$ 及び必要に応じ $70\text{ }\mu\text{m}$ 線量当量 $H_{70\mu\text{m}}$ を用いることが定められた。 $70\text{ }\mu\text{m}$ 線量当量とは弱透過性放射線が皮膚に与える影響を測定するための規定量であり、1 cm 線量当量はその他の組織全般を対象としている点に違いがある。なお、 $70\text{ }\mu\text{m}$ 、1 cm とは放射線が照射された物質の表面からの深さを示している。場所の線量測定においては周辺線量当量 $H^*(d)$ ($d=10\text{ mm}$, 0.07 mm)、個人の外部被曝線量測定においては個人線量当量 $H_p(d)$ を用いる。 $H^*(d)$ と $H_p(d)$ は前者がターゲットとして直径30 cmの球を、後者が平板(スラブ)を対象としているが、その値にほとんど差はない。

今回は実用量の代表として周辺線量当量の定義を選択し、月の放射線環境を見積もる。周辺線量当量 $H^*(10)$ とは次のような概念である。測定点を含む空間内のどの点の線量も等しいと仮定し、全ての放射線を一方向に揃えた拡張整列場を想定する。そこに直径30 cmの球を用意し、その放射線の入射方向に対向する半径上で球面から深さ10 mmの点における線量を求める。ターゲット物質には、比重が 1.0 g/cm^3 の組織等価物質で作られているICRU球を用いる。組織等価物質の内訳はICRUにより決められており酸素76.2%、炭素11.1%、水素10.1%、窒素2.6%で定義される[10]。周辺線量当量 $H^*(10)$ の定義の概念図を図1.1に示す。図1.1に示されるように周辺線量当量で扱うのは球の中の1点の線量である。周辺線量当量の単位はSI単位系で吸収線量と同じ J/kg を用いるが、人体に対する効果を含めるため、特別にこれをシーベルト(Sv)と定義する。

周辺線量当量は線量当量の定義に基づいて計算される。したがって、ICRU球中の特定の1点における、ある放射線Rの吸収線量 D_R [Gy] と線質係数 $Q(L_R)$

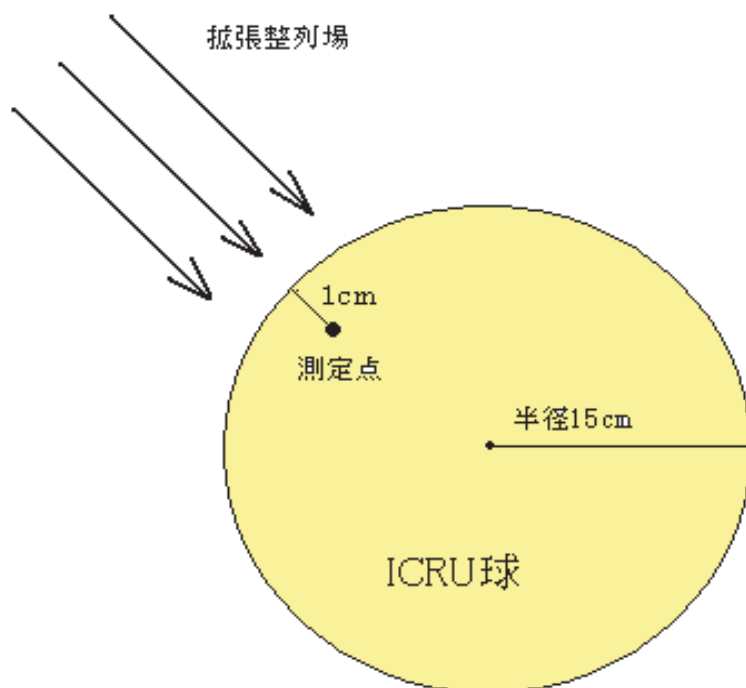


図 1.1: 周辺線量当量の定義の概念図。拡張整列場中に人体組織等価物質で満たされた密度 1.0 g/cm^3 の ICRU 球を仮定し、放射線の入射方向に対向する半径上で球面から深さ 1 cm の点における線量を周辺線量当量と定義する [10]。

[Sv/Gy] を用いて

$$H^*(10) = \sum_{\text{R}} D_{\text{R}} Q(L_{\text{R}}) \quad (1.2)$$

と表わされる。線質係数 $Q(L_{\text{R}})$ は ICRP で定義されており、線エネルギー付与 LET の関数として

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & (L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ 0.32L - 2.2 & (10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ 300/\sqrt{L} & (L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m}) \end{cases} \quad (1.3)$$

で表わされる。ここで $L [\text{keV}/\mu\text{ m}]$ は水中の LET である [10]。線質係数 Q は等価線量の定義で計算に用いられる w_{R} の良い近似値であるとされ、現在はもっぱら w_{R} を用いる等価線量が線量計算の主役である。しかし、粒子のエネルギーご

との LET を選択できる線質係数の定義は有用で、様々な放射線が広いエネルギースペクトルをもって混在するような複雑な放射線場では使用される。

周辺線量当量は地上での放射線環境を考慮して定義された量であるため、本来は中性子やガンマ線といった高透過率の放射線を対象とした環境モニタリングのための線量である。しかし本研究では宇宙線荷電粒子のような低透過率とされる重イオンや陽子等を含む放射線に対してもこの定義を拡張して適用することで、実用量と防護量の比較を行う。

防護量の定義として、本研究では実効線量当量と実効線量の2つを選択し、月環境での放射線量を計算する。実効線量当量 H_E は人体の組織や臓器全体の線量を計算しその加重平均を取ることで人体に対する線量を評価する指標である。その定義は、組織・臓器荷重係数 w_T 、線質係数 $Q(L)$ 、ある LET をもった放射線が付与する組織・臓器の吸収線量 $D_{T,L}$ を用いて

$$H_E = \sum_T w_T Q(L) \times D_{T,L} \quad (1.4)$$

のように表わされる。ある組織・臓器に対する線量当量を H_T とすると、式(1.4)は、

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (1.5)$$

で表記される。その単位はシーベルト (Sv) である [10]。実効線量当量は歴史的には古い定義であり、現在地球上の線量を評価する際にはあまり使用されない。よって組織・臓器荷重係数 w_T は後に示す近年の改定を含まない場合が多い。本研究ではその指針に則って、線量当量を計算する場合は、1990年に勧告された ICRP Publication 60 [10] の旧式の組織・臓器荷重係数 w_T を用いることとする。しかし、次に述べる実効線量の定義は2007年勧告である ICRP Publication 103 [9] の改定を含む。ICRP Publication 26 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [11] と ICRP Publication 60 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [10] と ICRP Publication 103 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [9] の違いを表 1.1 に示す。

実効線量 E は実効線量当量 H_E にとって代わる形で導入された防護量の一つで、ICRP により定義されている。線質係数で LET を用いて放射線ごとの重みづけをおこなう実効線量当量とは違い、実効線量 E は放射線荷重係数 w_R を用いた放射線ごとの重みづけを採用する。その詳細は、ある組織・臓器 T の実効線量 $H_{T,E}$ もしくはある組織・臓器 T の吸収線量 $D_{T,R}$ 、及び放射線荷重係数 w_R 、組織・臓器荷重係数 w_T を用いて、

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_T w_T H_{T,E} \quad (1.6)$$

表 1.1: ICRP Publication 26 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [11] と ICRP Publication 60 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [10] と ICRP Publication 103 で規定された組織・臓器荷重係数 w_T [9] の比較。

| Tissue | Tissue Weighting factor, w_T | | |
|-----------------|--------------------------------|---------|----------|
| | ICRP 26 | ICRP 60 | ICRP 103 |
| Bone surfaces | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Bladder | | 0.05 | 0.04 |
| Brain | | | 0.01 |
| Breast | 0.15 | 0.05 | 0.12 |
| Colon | | 0.12 | 0.12 |
| Gonads | 0.25 | 0.20 | 0.08 |
| Liver | | 0.05 | 0.04 |
| Lungs | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Oesophagus | | 0.05 | 0.04 |
| Red bone marrow | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Skin | | 0.01 | 0.01 |
| Stomach | | 0.12 | 0.12 |
| Thyroid | 0.03 | 0.05 | 0.04 |
| Salivary glands | | | 0.01 |
| Remainder | 0.30 | 0.05 | 0.12 |
| TOTAL | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

で定義される [9]。 w_R はある放射線 R が人体に与える生物学的効果を表す指標であり、これを吸収線量 D にかけることにより、人体の線量として取り扱えるようにしている。よって、実効線量の単位も人体に対する線量を示すシーベルト (Sv) で表記する。

ICRP の Publication 103 [9] によれば、放射線荷重係数 w_R の導入には以下のような背景があった。まず 1960 年代初期、ICRP Publication 26 [11] にて放射線防護の観点から人体に対する生物学的効果を考慮した指標である線質係数 Q が LET の関数として導入された。これは現在使用されている式 (1.3) とは異なる定義であった。ICRP Publication 26 で定義されていた線質係数 [11] と現在用いられている線質係数 [10] の違いを図 1.2 に示す。1990 年、放射線ごとの重みづけの概念は防護量である実効線量の計算に応用され、ICRP Publication 60 [10] は線質係数 Q の良い近似値として放射線荷重係数 w_R を導入した。当時の放射線荷重係数は

表 1.2: ICRP Publication 26 で規定された放射線荷重係数 w_R [11] と ICRP Publication 60 で規定された放射線荷重係数 w_R [10] と ICRP Publication 103 で規定された放射線荷重係数 w_R [9] の比較。

| | Radiation Weighting Factors, w_R | | |
|---|------------------------------------|---------------|-------------------|
| | ICRP 26 | ICRP 60 | ICRP 103 |
| Photons, all energies | 1 | 1 | 1 |
| Electrons and muons, all energies | 1 | 1 | 1 |
| Neutrons, all (unknown) energies | 10 | Step function | continus function |
| < 10 keV | 10 | 5 | 2.5 |
| 10 - 100 keV | | 10 | 2.5 to 10 |
| 100 - 2000 keV | | 20 | 10 to 20 |
| 2 - 20 MeV | | 10 | 7 to 17.5 |
| > 20 MeV | | 5 | 5 to 7 |
| Protons, eneriegy > 2 MeV | 10 | 5 | 2 |
| Alpha particles, fission fragments heavy nuclei | 20 | 20 | 20 |

現在の値とは異なるものである。その後、2007 年の ICRP Publication103 [9] でその値が改変された。ICRP Publication 60 勧告の放射線荷重係数 [10] と ICRP Publication 103 勧告の放射線荷重係数 [9] を表 1.2 にまとめる。より古い定義として、ICRP Publication 26 当時に示されていた放射線荷重係数の値も同時に表記する。荷電陽子に対する荷重係数値が 5 から 2 へと変えられたほか、中性子に対する荷重係数がエネルギーの連続関数として扱われるようになった点が大い。荷電粒子に対する放射線荷重係数がエネルギーの関数になっていない点や、荷電重粒子成分の放射線荷重係数がヘリウム核からそれ以上すべてにわたって一様に 20 と決められている点など、まだまだ改定の余地を多く残す定義であることは否めない。この不確定さから、実効線量は地球と異なる特殊な放射線環境で作業に従事する宇宙飛行士の線量を過大評価、もしくは過小評価する可能性がある。

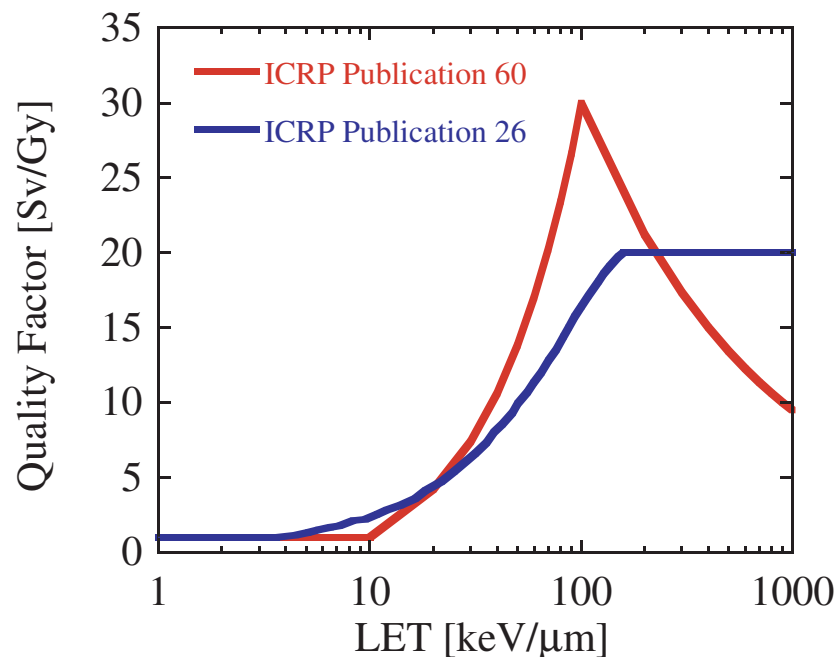


図 1.2: ICRP Publication26 で定義されていた線質係数 [11] と現在用いられている線質係数 [10]。

1.3 地上の線量

1.3.1 平常時の線量

地球上で生活する我々も常に何かしらの放射線被曝に晒されている。自然界に存在する放射線源による地球上における被曝の世界的な平均値とその内訳を表 1.3 に示す [12, 13]。表 1.3 から分かるように、我々は内部被曝、外部被曝を含め平均で 2.4 mSv/yr の被曝を受けている。外部被曝のみで見ると、年間の被曝量は宇宙線由来成分が 0.39 mSv/yr、カリウムやトリウム、ウランといった天然放射性元素由来のものが 0.48 mSv/yr である。

宇宙線由来成分と言っても、我々は地球自身が持つ厚い大気や磁場によって、宇宙からやってくる高エネルギーの荷電粒子を直接受けることはない。宇宙線の特に存在度の高い陽子成分が地球大気に進入してきても、大気中の物質と相互作用し、様々な二次粒子を生成しながらそのエネルギーを落としていく。エアシャワーと呼ばれるこの現象によって、地表付近では主に電子やミュオンが宇宙線由来成分の主役となる。高度及び大気の厚さごとに見たエアシャワーの概念図が Allkofer and Grieder [14] に示されている（図 1.4 参照 [14]）。航空機の運航する高

表 1.3: 原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR) 報告の自然界に存在する放射線源による地球上における被曝の世界的な平均値とその内訳 [12]。

| Source of exposure | Annual effective dose [mSv] | |
|--|-----------------------------|----------------------|
| | Average | Typical range |
| Cosmic radiation | | |
| Directly ionizing and Photon component | 0.28 (0.30) ^c | |
| Neutron component | 0.10 (0.08) | |
| Cosmogenic radionuclides | 0.01 (0.01) | |
| Total cosmic and cosmogenic | 0.39 | 0.3-1.0 ^b |
| External terrestrial radiation | | |
| Outdoors | 0.07 (0.07) | |
| Indoors | 0.41 (0.39) | |
| Total external terrestrial radiation | 0.48 | 0.3-0.6 ^c |
| Inhalation exposure | | |
| Uranium and thorium series | 0.006 (0.01) | |
| Radon (²²² Rn) | 1.15 (1.2) | |
| Thoron (²²⁰ Rn) | 0.10 (0.07) | |
| Total inhalation exposure | 1.26 | 0.2-10 ^d |
| Ingestion exposure | | |
| ⁴⁰ K | 0.17 (0.17) | |
| Total ingestion exposure | 0.29 | 0.2-0.8 ^e |
| Total | 2.4 | 1-10 |

^aResult of previous assessment [13] in parentheses.

^bRange from sea level to high ground elevation.

^cDepending on radionuclide composition of soil and building materials.

^dDepending on indoor accumulation of radon gas.

^eDepending on radionuclide composition of foods and drinking water.

度 40000 ft 付近では地上とは違い中性子による被曝も含まれることが図 1.4 から分かる。太陽活動の変調によって、地球に進入してくる宇宙線のフラックスが変動するため、一概には決められないが、日本からニューヨークの往復でもその被曝量は約 0.1-0.2 mSv 程度と大変低い。近年、放射線医学研究所では日本発着国際線の航路線量値をデータベース化し、それを基に海外渡航時に受ける被曝線量

を簡単に計算することができるツール・航路線量計算システム (Japanese Internet System for the Calculation of Aviation Route Doses; JISCARD) が開発され公開されている。このツールを用いることで、簡単に海外渡航時に受ける銀河宇宙線由来の二次粒子被曝線量の見積もりを概算することが可能になった。

カリウムやトリウム、ウランといった天然放射性元素由来の線量については地域差が大きい傾向が見られる。表 1.4 に特に線量値の高い地域の 1 時間当たりの吸収線量率を示す [12]。表 1.4 を見ると、ブラジルのガラパリやインドのケララ州などに特に高い線量率を示す場所があるのが分かる。トリウムを含むモナズ石や火山性の表土が高い線量率に起因していることが表 1.4 から分かる。このような高自然放射線地域の疫学は世界的にも調査研究がすすめられている。一方、日本国内の自然放射線量は世界平均よりも低く約 53 nG/h である [12]。地上 1m の高さでの線量率分布を図 1.3 に示す [15]。図 1.3 から分かるように、日本国内における線量分布の地域差はさほど大きくない。

表 1.4: 原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR) 報告による天然放射性元素由来の線量が特に高い地域の吸収線量率と日本の平均線量率の比較 [12]。

| Country | Area | Characteristics of area | Absorbed dose rate in air [nGy/h] |
|---------------------------|--|---|---|
| Brazil | Guarapari | Monazite sands; coastal areas | 90- 170 (streets) 90- 90000 (beaches) |
| China | Yangjiang Quangdong | Monazite particles | 370 average |
| Egypt | Nile delta | Monazite sands | 20- 400 |
| France | Central region Southwest | Granitic, schistous, sandstone area Uranium minerals | 20- 400 10- 10000 |
| India | Kerala and Madras Ganges delta | Monazite sands, coastal areas | 200- 4000 260- 440 |
| Iran (Islamic Rep. of) | Ramsar Mahallat | Spring waters | 70- 17000 800- 4000 |
| Italy | Lazio Campania Orvieto town South Toscana | Volcanic soil | 180 average 200 average 560 average 150- 200 |
| Niue Island | Pacific | Volcanic soil | 1100 maximum |
| Switzerland | Tessin, Alps, Jura | Gneiss, verucano, ²²⁶ Ra in karst soils | 100- 200 |
| Japan | Average | - | 53 |

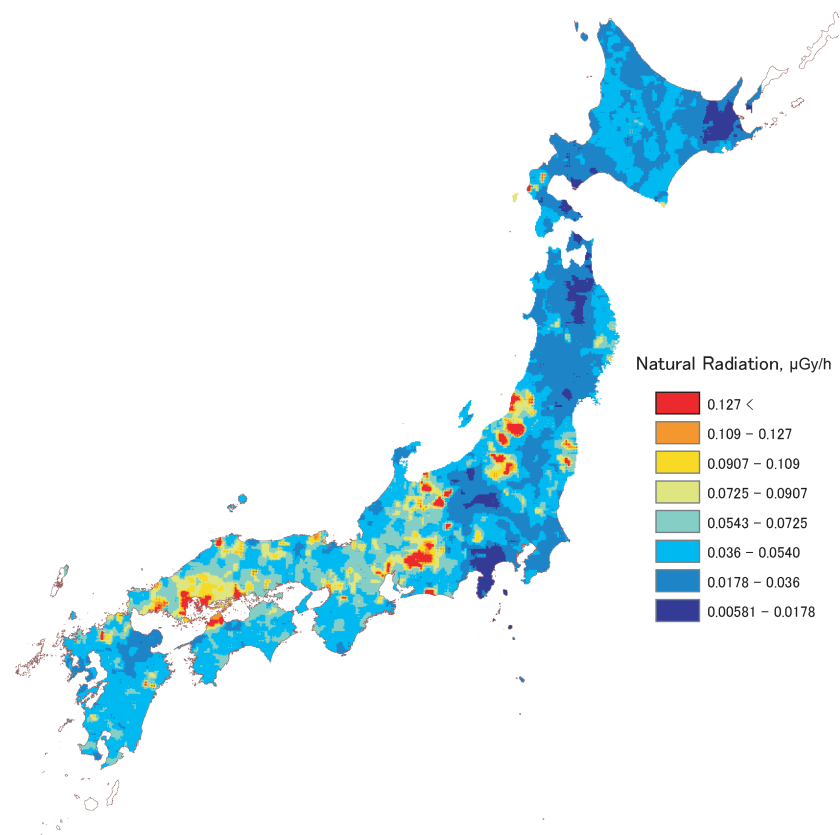


図 1.3: 産業技術総合研究所地質調査総合センターによる地上 1m の高さにおける日本の線量率分布 [15]。

上記で述べた自然界からの被曝とは別に、医療目的の被曝も存在する。表 1.3 には医療関係の被曝量は含まれていない。平成 18 年に改訂された社団法人日本放射線技師会報告の「医療被曝ガイドライン 2006」による X 線単純撮影の場合の低減目標値と IAEA ガイダンスレベルを表 1.5 に示す [16]。低減目標値とは患者の被曝線量を大幅に低減し、安全な検査を行うための目標値である。レントゲンだけでなく、X 線 CT 撮影や骨シンチグラフィーなどの核医学検査などについても吸収線量値や投与量値が細かく設けられており、腹部と頭部の X 線 CT 撮影に対する医療被曝ガイドラインはそれぞれ 20 mGy、65 mGy である [16]。

以上は一般的な生活レベルにおける放射線についてであった。しかし、放射線業務従事者など特定の作業に関わる人員には別途線量制限値が設けられている。その値は通常作業の場合、実効線量値で 100 mSv/5yr または 50 mSv/yr である。有事の際はこの値とは異なる基準が選択される。

表 1.5: 社団法人日本放射線技師会報告の「医療被曝ガイドライン 2006」による X 線単純撮影の場合の低減目標値と IAEA ガイダンスレベル [16]。

| 撮影部位 (撮影方向) | 日本放射線技師会 放射線診療における低減目標値 | IAEA ガイダンスレベル |
|----------------|----------------------------|------------------|
| 頭部 (正面) | 3 | 5 |
| 頭部 (側面) | 2 | 3 |
| 頸椎 (正側面) | 0.9 | - |
| 胸椎 (正面) | 4 | 7 |
| 胸椎 (側面) | 8 | 20 |
| 胸部 (正面) | 0.3 | 0.4 |
| 胸部 (側面) | 0.8 | 1.5 |
| 腹部 (正面) | 3 | 10 |
| 腰椎 (正面) | 5 | 10 |
| 腰椎 (側面) | 15 | 30 |
| 骨盤 (正面) | 3 | 10 |
| 股関節 (正面) | 4 | - |
| 大腿部 | 2 | - |
| 膝関節 | 0.4 | - |
| 足関節 | 0.3 | - |
| 前腕部 | 0.2 | - |
| 手指部 | 0.1 | - |

1.3.2 有事の際の線量

1.3.1 章で記述したように、基本的に地球上で生活する我々が高いエネルギーを持つ放射線に晒される可能際はほとんどない。しかし、有事の際の緊急作業や回復作業においては高い放射線量の許容が必要となる。2007 年に放射線防護基準に関する ICRP の勧告値が改訂された。1990 年勧告である ICRP Publication 60 [10] と今回の 2007 年勧告である ICRP Publication 103 [9] の防護規準の比較を表 1.6 に示す。これをもとに、2011 年 3 月に発生した東日本大震災時の福島第一原子力発電所の事故の際、厚生労働省は当発電所での作業者に限って線量制限値を 100 mSv から 250 mSv に引き上げた経緯がある。

表 1.6 より ICRP の公衆被曝の個人線量限度としては 1 mSv/yr という値が設けられている。ただし低線量長期被曝の放射線障害の実態については、そのしきい値が存在するのか否かなど未だ明らかになっていない問題が多い。なお、公衆被

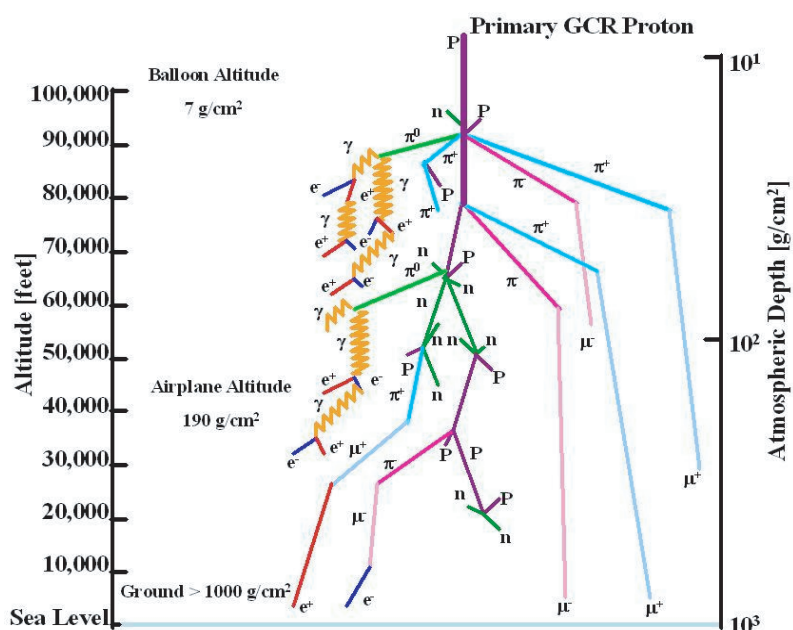


図 1.4: 高度及び大気の厚さごとに見たエアシャワーの概念図 [14]。

曝の個人線量限度には自然由来の放射線線量や医療目的の被曝は含まれていない。

高線量被曝の場合、明らかに急性障害の症状が出ることが報告されている。通常の健康な成人において、60 日以内に半数が死亡する線量は (LD_{50/60}) は 4 Gy 付近である。文献によっては 3-5 Gy の範囲としているものもある。LD₁₀ の推定値はおおよそ 1-2 Gy、LD₉₀ についてはおおよそ 5-7 Gy である [12]。50 Gy 程度からそれ以上の高い線量では、神経系及び心臓血管系への急性の損傷があり、2-3 日程度でショックによる死亡が起こる [9]。死亡に至るおおよその線量値と時間の関係を表 1.7 に示す。特にガンマ線による被曝の場合、全身被曝後の成人の臓器及び組織に関わる羅病の 1% 発生率と死亡に対する急性吸収線量のしきい値の推定値が報告されている [9]。それらを表 1.8 にまとめる。

表 1.6: 1990 年勧告 [10] とそれから派生した刊行物により提示された防護規準と最新の 2007 年勧告 [9] の防護規準の比較。

| 被曝のカテゴリ（刊行物番号） | 1990 年勧告とその後の刊行物 | 2007 年勧告 |
|---------------------------------------|--|--|
| 計画被曝状況 | | |
| | 個人線量限度 | |
| 回復作業(96)を含む職業被曝(60、68、75) | 規定された5年間の平均: 20 mSv/yr | 規定された5年間の平均: 20 mSv/yr |
| -眼の水晶体 | 150 mSv/yr | 150 mSv/yr |
| -皮膚 | 500 mSv/yr | 500 mSv/yr |
| -手と足 | 500 mSv/yr | 500 mSv/yr |
| -妊婦女性(申告後、残りの妊娠期間) | 腹部表面へ2 mSv、又は放射性核種の摂取による1 mSv | 胚/胎児に対し1 mSv |
| 公衆被曝(60) | 年間1 mSv | 年間1 mSv |
| -眼の水晶体 | 15 mSv/yr | 15 mSv/yr |
| -皮膚 | 50 mSv/yr | 50 mSv/yr |
| 線量拘束値 | | |
| 職業被曝(60) | ≤20 mSv/yr | ≤20 mSv/yr |
| 公衆被曝(77、81、82) | | 状況に応じ、1 mSv/yr 以下で選択 |
| -一般 | - | 状況に応じる |
| -放射性廃棄物処分 | ≤0.3 mSv/yr | ≤0.3 mSv/yr |
| -長寿命放射性廃棄物処理 | ≤0.3 mSv/yr | ≤0.3 mSv/yr |
| -長期被曝 | < ~1 及び ~0.3 mSv/yr | < ~1 及び ~0.4 mSv/yr |
| -長寿命核種からの長期成分 | ≤0.1 mSv/yr | ≤0.1 mSv/yr |
| 医療被曝(62、94、98) | | |
| -生物医学研究の志願者 | | |
| 社会への便利が以下の場合; | | |
| 少ない | <0.1 mSv | <0.1 mSv |
| 中間 | 0.1-1 mSv | 0.1-1 mSv |
| それほど大きくない | 1-10 mSv | 1-10 mSv |
| 大きい | >10 mSv | >10 mSv |
| -介助者と介護者 | 1 事例当たり 5 mSv | 1 事例当たり 5 mSv |
| 緊急時被曝状況 | | |
| | 介入レベル | 参考レベル |
| 職業被曝(60、96) | | |
| -救命活動(情報を知らされた志願者) | 線量制限なし | 他者への利益が救命者のリスクを上回る場合は線量制限なし |
| -他の緊急救助活動 | ~ 500 mSv ; ~ 5 Sv (皮膚) | 1000 又は 500 mSv |
| -他の救助活動 | | ≤ 100 mSv |
| 公衆被曝(63、96) | | |
| -食糧 | 10 mSv/yr | |
| -安定ヨウ素の配布 | 50 ~ 500 mSv/yr (甲状腺) | |
| -屋内避難 | 2 日で 5 ~ 50 mSv | |
| -一時的な避難 | 1 週間で 50 ~ 500 mSv | |
| -恒久的な移住 | 初年度に 100 mSv 又は 1000 mSv | |
| -全体的な防護戦略 | | 状況に応じ一般的に 20 mSv/yr から 100 mSv/yr の間 |
| 現存被曝状況 | | |
| | 対策レベル | 参考レベル |
| ラドン(65) | | |
| -住居内 | 3 ~ 10 mSv/yr (200 ~ 600 Bq/m ³) | <10 mSv/yr (600 Bq/m ³) |
| -作業場内 | 3 ~ 10 mSv/yr (500 ~ 1500 Bq/m ³) | <10 mSv/yr (1500 Bq/m ³) |
| 一般参考レベル | | |
| NORM、自然バックグラウンド放射線、人間の居住環境中の放射性残渣(82) | | |
| 介入: | | |
| -正当化できそうにない | < ~ 10 mSv/yr | 状況に応じ |
| -正当化できるかもしれない | > ~ 10 mSv/yr | 1 mSv/yr から |
| -ほとんど常に正当化できる | 100 mSv/yr まで | 20 mSv/yr の間 |

表 1.7: ICRP Publication 103 による低 LET 急性放射線全身均等被曝による、人の特定の放射線誘発症候群及び死亡に関連する線量の範囲 [9]。

| Whole body absorbed dose* (Gy) | Principal effect contributing to death | Time of death after exposure (day) |
|--------------------------------|--|------------------------------------|
| 3-5 | Damage to bone marrow ($LD_{50/60}$) | 30-60 |
| 5-15 | Damage to the gastrointestinal tract | 7-20 |
| 5-15 | Damage to the lungs and kidney | 60-150 |
| >15 | Damage to nervous system | <5, dose dependent |

*Some dose range data include judgments from outcomes of partial body irradiation.

表 1.8: ICRP Publication 103 による全身ガンマ線被曝後の成人の臓器及び組織に関わる罹病の 1% 発生率と死亡に対する急性吸収線量のしきい値の予測推定値 [9]。

| Effect | Organ/tissue | Time to develop effect | Absorbed dose (Gy) |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| Morbidity: | | | 1% Incidence |
| Temporary sterility | Testes | 3-9 weeks | ~0.1 |
| Permanent sterility | Testes | 3 weeks | ~6 |
| Permanent sterility | Ovaries | < 1week | ~3 |
| Depression of blood-forming process | Bone marrow | 3-7 days | ~0.5 |
| Main phase of skin reddening | Skin (large areas) | 1-4 weeks | <3-6 |
| Skin burns | Skin (large areas) | 2-3 weeks | 5-10 |
| Temporary hair loss | Skin | 2-3 weeks | ~4 |
| Cataract (visual impairment) | Eye | Several years | ~1.5 |
| Mortality: | | | |
| Bone marrow syndrome: | | | |
| - without medical care | Bone marrow | 30-60 days | ~1 |
| - with good medical care | Bone marrow | 30-60 days | 2-3 |
| Gastro-intestinal syndrome: | | | |
| - without medical care | Small intestes | 6-9 days | ~6 |
| - with good medical care | Small intestes | 6-9 days | >6 |
| Pneumonitis | Lung | 1-7 months | 6 |

表 1.9: NCRP1989 年勧告の生涯実効線量制限値 [17]。

| Age | Female [Sv] | Male [Sv] |
|-----|-------------|-----------|
| 25 | 1.0 | 1.5 |
| 35 | 1.75 | 2.5 |
| 45 | 2.5 | 3.2 |
| 55 | 3.0 | 4.0 |

表 1.10: NCRP2000 年勧告の 10 年実効線量制限値 [18]。

| Age at exposure | Female [Sv] | Male [Sv] |
|-----------------|-------------|-----------|
| 25 | 0.4 | 0.7 |
| 35 | 0.6 | 1.0 |
| 45 | 0.9 | 1.5 |
| 55 | 1.7 | 3.0 |

1.4 宇宙空間における線量

1.4.1 国際宇宙ステーションにおける線量計測

宇宙空間の放射線環境は地球上の放射線環境とは全く異なる。国際宇宙ステーションやスペース・シャトルは低地球軌道 (Low Earth Orbit; LEO) を周回しており、その高度はおよそ 300-500 km である。LEO 軌道における主要な放射線源は銀河宇宙線、太陽粒子線、地球磁場に捕捉された粒子線の 3 種である。また、地球大気によるアルベド粒子も存在する。一次粒子としては陽子が最も存在度の高い成分であり、アルベド粒子としては中性子が最も人体に寄与する成分である。

このような環境の中で作業する宇宙飛行士の安全性を保持するため、NCRP では LEO ミッションに従事する宇宙飛行士の実効線量当量制限を 1989 年に勧告した。NCRP1989 年勧告の生涯実効線量制限値を表 1.9 に示す [17]。線量制限値は宇宙飛行士の年齢や性別によって異なる。さらに近年、実効線量による防護量の定量化が一般的になってきたことを受けて、NCRP2000 年勧告では LEO ミッションに従事する宇宙飛行士の 10 年実効線量制限値を勧告した。NCRP2000 年勧告の 10 年実効線量制限値を表 1.10 に示す。実効線量制限値と実効線量値を比較すると、2000 年勧告の実効線量値の制限が大幅に厳しくなっている。しかし、2000 年勧告の実効線量制限は 10 年という期間を区切っている点が異なる。

国際宇宙ステーションでは宇宙飛行士の長期の宇宙滞在に備え、放射線リスク

評価を目的として実際に放射線量を計測する試みも始められている。そのうちのひとつが、MATROSHKA 実験 [19] である。2004 年 1 月から国際宇宙ステーションには、欧州宇宙機関が計画した MATROSHKA 実験の中心となる人体模型（ファントム）が据え付けられている。MATROSHKA 内のファントムは人間の上半身に似せていて、人体組織等価のポリウレタンで構成されている。またファントムには人体内の線量と粒子分布をより正確に把握するための数千個の放射線センサーが備え付けられている。ファントムの構造を図 1.5 に示す [20]。

ファントム内部で TLD により測定された吸収線量の深部線量分布とポンチョに縫い付けられた検出器によって測定された吸収線量分布は図 1.6 のように報告されている [20]。実験値を基にシミュレーション計算を行い、国際宇宙ステーション滞在時の被曝量を臓器線量として示した結果は図 1.7 に示されている [20]。MATROSHKA 実験のように組織等価な物質の人体模型を使った線量計測は人体中の二次粒子を考慮することもでき、大変有効な手段である。

1.4.2 月での線量計測と過去のシミュレーション結果

月の放射線環境は LEO 軌道とも異なる。地球の大気や磁場の影響を受けず、さらに一次宇宙線が相互作用する対象としての月表面物質量は国際宇宙ステーションの比ではない。実際の月表面における線量計測は今のところ実現してはいないが、いくつかのシミュレーション計算がアポロ探査の時代より報告されている。1985 年に Silberberg らが計算した月表面の年間線量当量は 30 rem/y と報告されている [21]。これは現在の規準に直すと、年間 300 mSv の人体被曝に相当する。しかし、ここでは太陽活動に伴う線量変動は考慮されていなかった。Adams らは線量当量の定義に基づいて 1977 年の太陽活動極小値における荷電粒子とアルベド中性子による月面線量を 244 mSv/yr と計算した [22]。近年には 2007 年には De Angelis ら [23] が、そして 2009 年には Pham and El-Genk [24] が月レゴリスをシールドとして使用した際の大規模太陽フレアに対する実効線量を求めている。しかし、線量定義の違いやファントム、計算コードの違いなどから、それぞれの報告値にはばらつきがあるのが現状である。

また、近年、実際に月の放射線環境を測定しようという遠隔探査ミッションも行われている。2008 年 10 月に打ち上げられたインドの月遠隔探査機 Chandrayaan-1 に搭載されていた放射線モニタ（Radiation Dose Monitor; RADOM）[3] は月への旅程の中で放射線帯を通過する際の電子や陽子の粒子フラックスと吸収線量率を測り、電子フラックスは最大で $\sim 15,000 \text{ /cm}^2/\text{s}$ 、吸収線量率換算で $\sim 40,000 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ と報告している。また陽子は最大 $\sim 9,600 \text{ /cm}^2/\text{s}$ のフラックスを計測し、吸収線量換算で $\sim 130,000 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ としている。また同様に月の 200 km 高度では



図 1.5: < A > 能動型放射線検出器システムを備えた上半身人体模型（ファントム）。< B > 皮膚線量測定用に吸収線量検出器システムを備えたポンチョとフードを装着した上半身ファントム。< C > 炭素繊維で出来たファントム用宇宙服。< D > 高温から保護するための多層断熱剤（MLI）で覆われた、打ち上げ直前の人体模型 [20]。

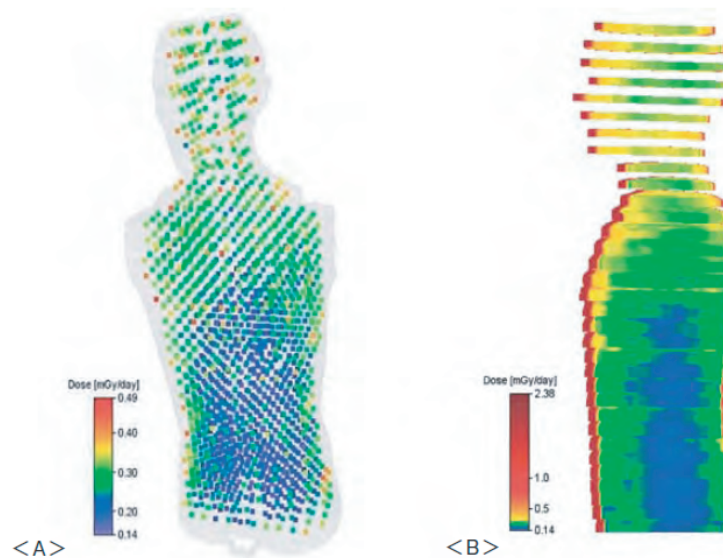


図 1.6: < A > 人体ファントム内部で TLD により測定された吸収線量の深部線量分布。< B > ポンチョに縫い付けられた検出器によって測定された吸収線量分布 [20]。

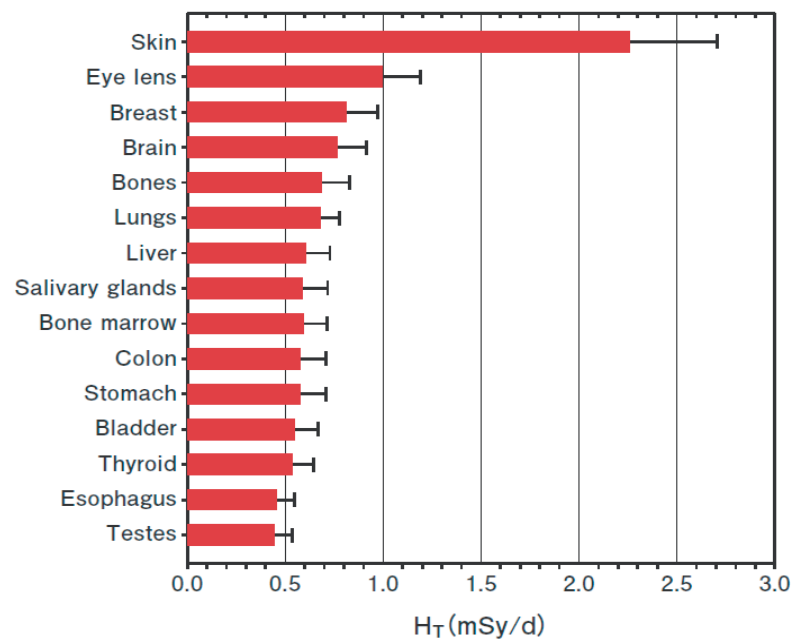


図 1.7: Reitz らの報告による MATROSHKA 実験をもとに算出された臓器線量当量 [20]。

10.7 $\mu\text{Gy/h}$ の線量を見込んでいる [25]。RADOM のフライトモデルを図 1.8 に示す [25]。RADOM の構造を見るに、組織等価な物質で人体の線量を測るものではなく、むしろ観測機器に対する放射線損傷の度合いに重点を置いているものと思われる。公表されている線量値も人体の線量を表すシーベルト (Sv) 単位ではなく、一般的な吸収線量を表すグレイ (Gy) 表記であることからそのことがうかがい知れる。

宇宙での長期滞在に備えて、人体に大きく寄与してくる 10 MeV 以上の銀河宇宙線及び太陽粒子線 LET スペクトルを実際に計測しようとしたのが、2009 年 6 月打ち上げのアメリカによる月探査衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter; LRO に搭載されている Cosmic Ray Telescope for Effects of Radiation (CRaTER) [26] である (図 1.9 参照)。素材として組織等価プラスチック (tissue-equivalent plastic; TEP) を用いており、月の高度 50 km を周回しながら月の放射線環境を測定している。本機器の解析結果が待たれるところである。



図 1.8: RADOM フライトモデル [25]。

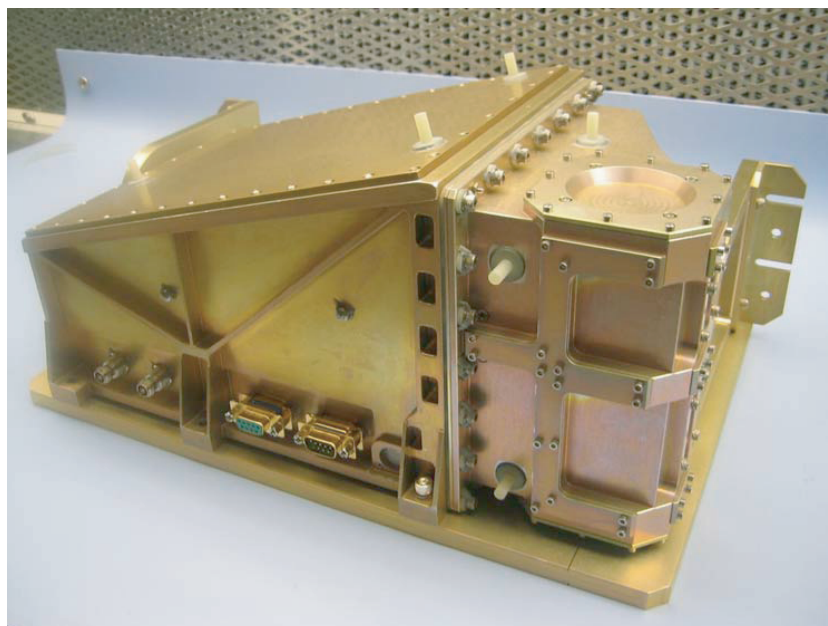


図 1.9: CRaTER フライトモデル [26]。

1.4.3 火星有人探査に向けた放射線管理

火星の有人探査はアメリカが中心となって計画を進めており、月に比べてそのミッション期間も長いことから慎重な放射線環境評価が必要とされている。LEO軌道のミッションと月、火星探査ミッションのミッション期間の比較を表 1.11 に示す [27]。

火星には月と異なり大気が存在する。ゆえに、一次宇宙線の大気との相互作用も重要である。また表面組成は月とは若干異なる。よって月とは異なった放射線環境となっている。2004 年、Saganti らは水を遮蔽材として使用した場合の臓器線量を地球-火星間の飛行中及び、火星表面滞在時の場合に分けて報告した。それぞれのシミュレーション結果を表 1.12、表 1.13 に示す [28]。また、Saganti らは火星の高度と皮膚線量の変化を報告している。大気存在に起因して高度による線量変動の激しい火星表面の線量分布を図 1.10 に示す [28]。

1.4.4 その他の有人惑星探査に向けた放射線管理

2004 年、De Angelis らは木星系への有人探査の計画として NASA の RASC (Revolutionary Aerospace Systems Concepts) プログラムにおけるカリスト衛星探査の際の放射線量の見積もりをシミュレーション計算を用いて行った [29]。木星系で主要になる放射線源として考えられるのは、銀河宇宙線、太陽粒子線の他に木星の放射線帯に捕捉された粒子がある。De Angelis らの報告するカリストの放射線帯捕捉電子の微分スペクトルを図 1.11 に示す [29]。また、ミッション全期間を通しての実効線量率を各種の遮蔽材を用いて見積もった結果を図 1.12 に示す [29]。LEO ミッションにおける線量制限と図 1.12 の結果を比較して、年配の男性宇宙

表 1.11: NASA のテクニカルレポートによる LEO 軌道ミッションと想定される月及び火星探査の期間 [27]。

| Exploration mission | Time period | Total days | Deep space days | Lunar or Mars surface days |
|---------------------|-------------|------------|-----------------|----------------------------|
| LEO CEV test | 2012-15 | 6 | 6 (LEO) | 0 |
| Lunar-short | 2014-20 | 14 | 6 | 8 |
| Lunar-long | 2020-30 | 90 | 6 | 84 |
| Mars swingby* | 2030-40 | 600 | 600 | 0 |
| Mars surface | 2030-40 | 1000 | 400 | 600 |

*Mars swingby mission is unlikely to be inherently feasible and affordable.

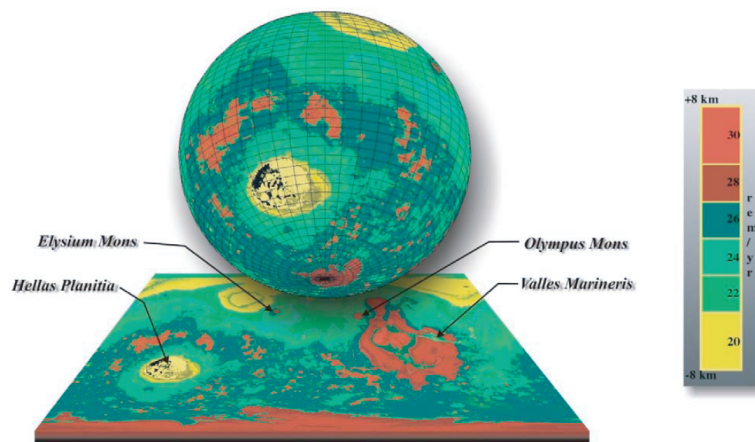


図 1.10: 太陽活動極小期の火星表面における皮膚線量当量と高度の関係 [28]。

飛行士であれば、線量制限値を超えることなく木星系への探査が可能であることを報告して、月や火星を越えた深宇宙への人類の進出がこれから現実的なものになっていくことが示唆されている。

1.5 本研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では線量計算による月面の放射線環境の把握を行う。特に注目すべき点は本研究が高精度な宇宙線観測結果とアポロ時代よりさらに発達したモンテカルロコードを用いた月面線量の再評価であること、3種類の異なる定義を用いた線量評価で月の線量を計算し比較していること、そして本計算が最新のICRP勧告による線量定義の改良を含んでいることである。最新の宇宙線観測データの使用により、太陽活動変動を含めた月線量の計算が可能となった。最新のモンテカルロ計算コードは、月表層における放射線の発生・輸送の場所による差を示すために使用する。また定義の異なる線量を計算し比較することで、地球とは異なる月の放射線環境評価を最適に評価する線量定義を模索することができる。

また本研究では線量計算を通して浮き彫りとなった問題点やさらなる改善点をまとめ、将来の月探査に向けた課題を示す。本研究は長期にわたり月に滞在する月面居住者（作業従事者）の線量管理に貢献できるため、今後の日本の宇宙開発の促進につながる大きな意義を持つものと考え、本研究は国内ではほとんど行われていない月の線量評価に焦点を当て、今後の有人月探査、有人宇宙探査へと進んでいくための、第一歩である。本研究結果や提言が今後、有人探査ガイドラ

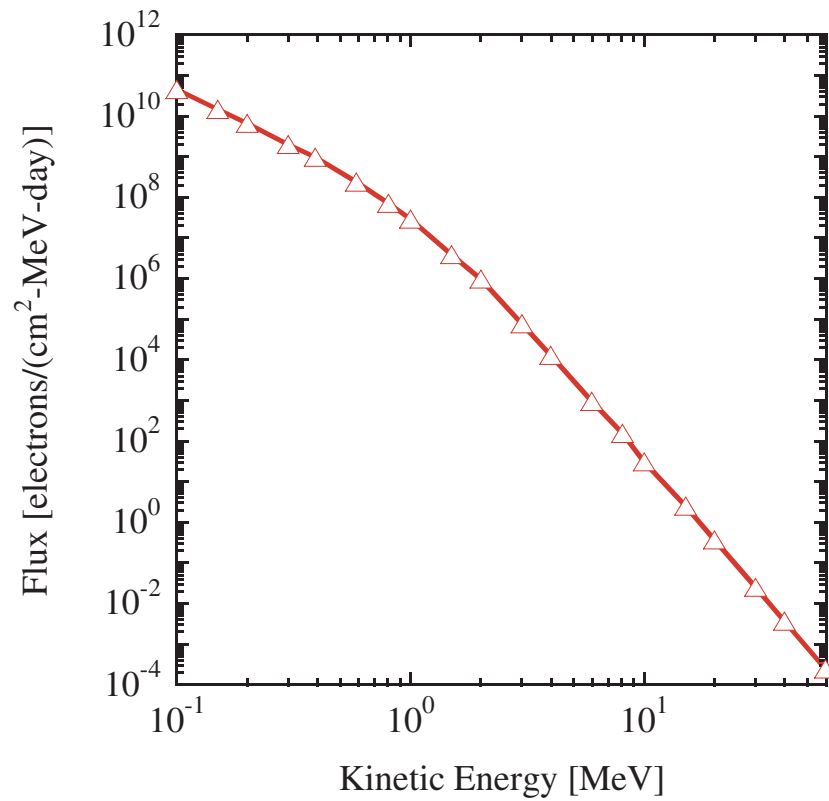


図 1.11: Angelis らによるカリストの放射線帯捕捉電子の微分スペクトル [29]。

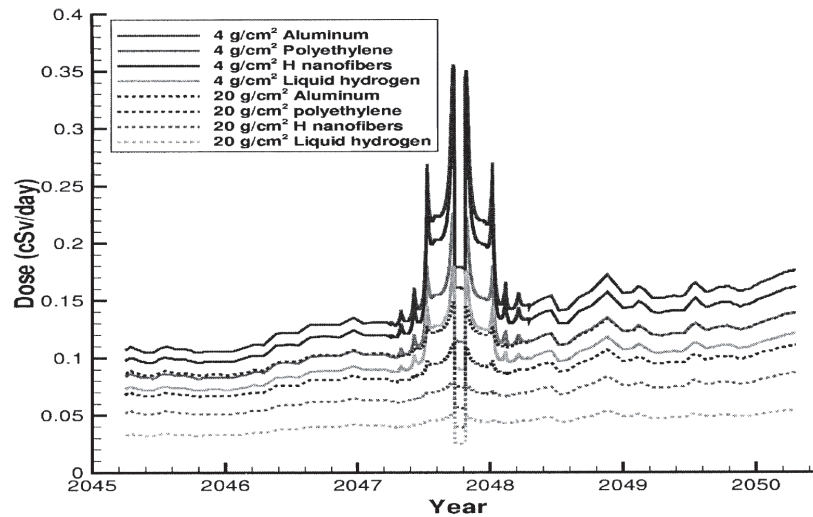


図 1.12: Angelis らによるカリスト探査全期間を通しての実効線量率を各種の遮蔽材を用いて見積もった結果 [29]。

インを作成するにあたり一つの指標となることを目指す。

表 1.12: Saganti らによる地球から火星へのフライト中に受ける太陽活動極小期の臓器線量の水による遮蔽効果 [28]。

| Organ | Organ Dose Equivalent (cSv/yr) | | | | |
|-----------|--------------------------------|------|-------|-----------------------|------------------------|
| | 0 cm | 5 cm | 10 cm | %Reduction by 5 cm | %Reduction by 10 cm |
| Point | 120.0 | 95.6 | 74.3 | 20.3% | 38.1% |
| Skin | 94.1 | 73.2 | 60.0 | 22.3% | 36.2% |
| Eye | 96.0 | 73.7 | 60.5 | 23.2% | 37.0% |
| BFO | 70.0 | 58.2 | 50.7 | 16.9% | 27.6% |
| Bladder | 60.1 | 52.0 | 46.7 | 13.5% | 22.4% |
| Colon | 69.0 | 57.7 | 50.5 | 16.4% | 26.9% |
| Esophagus | 65.9 | 55.6 | 48.9 | 15.6% | 25.7% |
| Gonads | 73.7 | 60.0 | 51.7 | 18.6% | 29.9% |
| Liver | 63.5 | 54.1 | 48.0 | 14.8% | 24.4% |
| Lung | 66.8 | 56.2 | 49.4 | 15.9% | 26.1% |
| Stomach | 61.0 | 52.6 | 47.1 | 13.7% | 22.7% |
| Thyroid | 72.6 | 59.8 | 51.8 | 17.6% | 28.7% |

表 1.13: Saganti らによる火星表面における太陽活動極小期の臓器線量の水による遮蔽効果 [28]。

| Organ | Organ Dose Equivalent (cSv/yr) | | | | |
|-----------|--------------------------------|------|-------|-----------------------|------------------------|
| | 0 cm | 5 cm | 10 cm | %Reduction by 5 cm | %Reduction by 10 cm |
| Point | 25.8 | 21.3 | 20.1 | 17.4% | 22.1% |
| Skin | 19.3 | 18.6 | 18.0 | 3.8% | 6.8% |
| Eye | 19.7 | 18.8 | 18.2 | 4.4% | 7.7% |
| BFO | 19.4 | 18.7 | 18.0 | 3.9% | 6.9% |
| Bladder | 21.1 | 19.7 | 18.9 | 6.4% | 10.5% |
| Colon | 19.2 | 18.5 | 18.0 | 3.6% | 6.6% |
| Esophagus | 19.1 | 18.5 | 17.9 | 3.4% | 6.2% |
| Gonads | 19.8 | 18.9 | 18.3 | 4.3% | 7.5% |
| Liver | 19.6 | 18.8 | 18.2 | 4.0% | 7.2% |
| Lung | 19.6 | 18.8 | 18.2 | 4.0% | 7.1% |
| Stomach | 21.1 | 19.8 | 19.0 | 6.1% | 10.2% |
| Thyroid | 19.0 | 18.3 | 17.8 | 3.4% | 6.1% |

参考文献

- [1] Kato, M., Sasaki, S., Tanaka, K., Iijima, Y., Takizawa, Y., 2008, The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status, *Adv. Space Res.*, **42**, 294-300.
- [2] Sun, H. X. and Dai, S. W., 2005, Mission objectives and payloads for the first lunarexploration of China, *Acta Astron.*, **47**, 2218-2223.
- [3] Goswamia, J. N, and Annaduraib, M., 2008, Chandrayaan-1 mission to the Moon, *Acta Astron.*, **63**, 1215-1220.
- [4] Chin, G., Brylow, S., Foote, M., Garvin, J, Kasper, J., Keller, J., Litvak, M., Mitrofanov, I., Paige, D., Raney, K., Robinson, M., Sanin, A., Smith, D., Spence, H., Spudis, P., Stern, S. A., Zuber, M., 2007, Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission, *Space Sci. Rev.*, **129**, 4, 391-419.
- [5] Galimov, E M., 2005, Luna-Glob project in the context of the past and present lunar exploration in Russia, *J. Earth Syst. Sci.*, **114**, 801-806.
- [6] Tanaka, S., Shiraishi, H., Kato, M., Okada, T., Science Working Group of Post SELENE Missions, 2008, The science objectives of the SELENE-II mission as the post SELENE mission, *Adv. Space Res.*, **42**, 394-401.
- [7] Zheng, Y., Ouyang, Z., Li, C., Liu, J., Zou, Y., 2008, China's Lunar Exploration Program: Present and future, *Plan. Space Sc.*, **56**, 881-886.
- [8] Taylor, G. J., 2004, Planet. Sci. Res. Discovery: Cosmochemistry and Human Exploration, <http://www.psrh.hawaii.edu/Dec04/spaceResources.html>.
- [9] International Commission on Radiological Protection (2007) *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annals of ICRP 37, 2-4*, Oxford: Pergamon Press.

- [10] International Commission on Radiological Protection (1991) *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21, 1-3*, Oxford: Pergamon Press.
- [11] International Commission on Radiological Protection (1977) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Annals of the ICRP 1 (3)*, Oxford: Pergamon Press.
- [12] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Pubns, New York.
- [13] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993) *United Nations Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2*. United Nations, New York.
- [14] Allkofer, O. C. and Grieder, P. K. F. (1984) *Cosmic Rays on Earth*. Fachinformationszentrum Energies, Physik, Mathematik. Physics Data No. 25-1, Karlsruhe.
- [15] 今井登, 寺島滋, 太田充恒, (2010) 海と陸の地球化学, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- [16] 社団法人日本放射線技師会 (2009) 放射線量適正化のための医療被曝ガイドライン 放射線診療における線量低減目標値とその実践, 文光堂.
- [17] National Council on Radiation Protection and Measurements (1989) *Guidance on Radiation Received in Space Activities, NCRP Report No. 98*, Bethesda, Maryland.
- [18] National Council on Radiation Protection and Measurements (2000) *Radiation Protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit, NCRP Report No. 132*, Bethesda, Maryland.
- [19] Reitz G, Berger T, Bilski P, Facius R, Hajek M, Petrov V, Puchalska M, Zhou D, Bossler J, Akatov Y, Shurshakov V, Olko P, Ptaszkiewicz M, Bergmann R, Fugger M, Vana N, Beaujean R, Burmeister S, Bartlett D, Hager L, Palfalvi J, Szabo J, O'Sullivan D, Kitamura H, Uchihori Y, Yasuda N, Nagamatsu A, Tawara H, Benton E, Gaza R, McKeever S, Sawakuchi G, Yukihara E,

- Cucinotta F, Semones E, Zapp N, Miller J, Dettmann J., 2009, Astronaut's Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space Station, *Radiat Res.*, **171**, 225-235.
- [20] Reitz G., 2010, Radiation dose assessment in space missions The MATROSHKA Experiment, *Radiological Sciences*, **53**, 8-27.
- [21] Silberberg, R., Tsao, C. H., Adams, J. H., Jr., Letaw, J. R., (1985) *Radiation Transport of Cosmic Ray Nuclei in Lunar Material and Radiation Doses*, in: Mendell, W. W. (Ed), *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX, pp. 663-669.
- [22] Adams, J. H., Jr., Silberberg, R., Tsao, C. H., (1981) *Cosmic Ray Effects on Microelectronics, Part I: The Near-Earth Particle Environment*, *NRL Memorandum Report 4506*, Naval Research Laboratory, Washington D.C.
- [23] De Angelis, G., Badavi, F. F., Clem, J. M., Blattnig, S. R., Cloudsley, M. S., Nealy, J. E., Tripathi, R. K., Wilson, J. W., 2007, Modeling of the Lunar Radiation Environment, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, **166**, 169-183.
- [24] Pham, T. T., El-Genk, M. S., 2009, Dose estimates in a lunar shelter with regolith shielding, *Acta Astron.*, **64**, 697-713.
- [25] Dachev, T. P., Tomov, B. T., Matviichuk, Yu. N., Dimitrov, P. S., Vadawale, S. V., Goswami, J. N., De Angelis, G., Girish, V., 2011, An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite, *Adv. Space Res.*, **48**, 779-791.
- [26] Spence, H. E., Case, A. W., Golightly, M. J., Heine, T., Larsen, B. A., Blake, J. B., Caranza, P., Crain, W. R., George, J., Lalic, M., Lin, A., Looper, M. D., Mazur, J. E., Salvaggio, D., Kasper, J. C., Stubbs, T. J., Doucette, M., Ford, P., Foster, R., Goeke, R., Gordon, D., Klatt, B., O'Connor, J., Smith, M., Onsager, T., Zeitlin, C., Townsend, L. W., Charara, Y., 2010, CRaTER: The Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation Experiment on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission, *Space Sci. Rev.*, **150**, 243-284.
- [27] Cucinotta, F. A., Kim, M.-H. Y., Ren, L., 2005, Managing Lunar, Radiation Risks, Part I: Cancer, Shielding Effectiveness, NASA/TP-2005-213164.

- [28] Saganti, P. B., Cucinotta, F. A., Wilson, J. W., Simonsen, L. C., Zeitlin, C., 2004, Radiation climate map for analyzing risks to astronauts on the Mars surface from galactic cosmic rays, *Space Sci. Rev.*, **110**, 143-156.
- [29] De Angelis, G., Cloudsley, M. S., Nealy, J. E., Tripathi, R. K., Wilson, J. W., 2004, Radiation analysis for manned missions to the Jupiter system, *Adv. Space Res.*, **34**, 1395-1403.

第2章 月の放射線環境モデルと線量 計算条件

本章では月の宇宙線環境のモデルと計算条件について述べる。月での線量計算を行う場合に大切なことのひとつに、精度の良い月放射線環境モデルを選択することがあげられる。最新の宇宙線測定に基づくより高精度な観測データとモデルをもとに線量を計算する必要がある。本研究では近年発表された宇宙線の最新観測データをもとに線量計算を行うと同時に、アポロ探査時代に比べさらに進歩したモンテカルロ計算により放射線の発生・輸送を取り扱う。月表層中の二次粒子のふるまいを Geant4 コードで計算する。また人体と放射線との相互作用に関しては PHITS コードを用いて計算がなされている。

2.1 銀河宇宙線

月には地球のような厚い大気や強い磁場がないため、等方的に宇宙を飛び交う銀河宇宙線は直接月の表面に降り注ぎ、月面線量に大きく寄与してくる。銀河宇宙線は核成分 98% と電子成分 2% からなり、核成分の大半である約 87% を陽子が占めている。その他、アルファ粒子が約 12%、原子番号 3 以上の重粒子成分は核成分全体の約 1% 程度とその存在度は大変少ないことが報告されている [1]。

銀河宇宙線はエネルギースペクトルを持っており、10 GeV 以上の陽子は $E^{-2.75}$ で太陽系に到来すると考えられている [2]。また 10 GeV 以下のエネルギー領域では、太陽活動に連動する太陽磁場の影響を受けるため、銀河宇宙線荷電粒子のエネルギースペクトルはこのエネルギー領域で変調を受ける。一般に、太陽活動が活発な太陽活動極大期においては、太陽磁場の影響も強くなるので、地球近傍に届く低エネルギー銀河宇宙線は少なくなる。対して、太陽活動が穏やかな太陽活動極小期には太陽磁場の影響が弱まり、地球近傍に届く銀河宇宙線低エネルギー強度は大きくなる。太陽の活動周期は約 11 年で、それに伴って低エネルギー領域の銀河宇宙線荷電粒子の強度は増減する。

地球近傍の銀河宇宙線核成分の微分エネルギースペクトル J_i は Force Field approximation [3, 4] によって以下のようにモデリングされる。

$$J(T, \phi) = J_{\text{LIS},i}(T + \Phi) \frac{(T)(T + 2T_p)}{(T + \Phi)(T + \Phi + 2T_p)}, \quad (2.1)$$

$$\Phi = \frac{Ze}{A} \phi \quad (2.2)$$

ここで T [MeV/nucleon] は銀河宇宙線核子の運動エネルギー、 Z は原子番号、 A は質量数、 T_p は陽子の静止質量 938 MeV、 $J_{\text{LIS},i}$ は銀河宇宙線核子 i の局所恒星間スペクトル (local interstellar spectrum ; LIS)、 ϕ [MV] は太陽活動により銀河宇宙線が受ける変調の係数である。

銀河宇宙線陽子成分及びアルファ粒子成分のエネルギースペクトルについては近年高精度な観測が進んでおり、特に 1997 年から 2002 年に渡り実施された Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer (BESS) の気球観測 [5] では太陽活動に伴う銀河宇宙線の変調を含め Force Field approximation に対するフィッティングパラメータが与えられた。Shikaze らの論文によれば、 $\beta = v/c$ 、 R をリジリティ、 A 、 P_1 、 P_2 をパラメータとすると星間空間の銀河宇宙線陽子及びアルファ粒子のエネルギースペクトルは、

$$J_{\text{LIS}} = A\beta^{P_1} R^{P_2} \quad (2.3)$$

表 2.1: BESS の気球観測データにより与えられた式 2.3 のパラメータ値。

| | A | P_1 | P_2 |
|--------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| Proton | $(1.94 \pm 0.13) \times 10^4$ | 0.70 ± 0.52 | 2.76 ± 0.03 |
| Helium | $(7.10 \pm 0.56) \times 10^3$ | 0.50 ± 0.31 | 2.78 ± 0.03 |

と表される [5]。BESS の高精度観測から得られたフィッティングパラメータを表 2.1 に示す。

図 2.1 に太陽活動極小期である 1997 年 ($\phi=491$ MV) と太陽活動極大期である 2000 年 ($\phi=1300$ MV) の BESS の観測データ (プロット) と式 2.1, 2.2, 2.3 及び表 2.1 のフィッティングパラメータから得られる銀河宇宙線陽子、アルファ粒子のエネルギースペクトルを表す。

アルファ粒子以上の銀河宇宙線重粒子成分に関しては、現在のところ BESS のような高精度な宇宙線観測は行われていない。過去に、地球近傍で計測された宇宙線観測結果によれば、銀河宇宙線重粒子成分のエネルギースペクトル形状は図 2.2 のように示されている [6]。

本研究では図 2.1 に示されているアルファ粒子のエネルギースペクトルを、銀河宇宙線の相対存在度を用いて規格化し、そのエネルギースペクトルを用いて銀河宇宙線重粒子成分の線量計算を行った。1997 年に打ち上げられた Advanced Composition Explorer (ACE) spacecraft 搭載の観測機器 Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS) は銀河宇宙線の相対強度を高精度に観測した [7]。本研究では規格化に用いた銀河宇宙線の相対存在度はこの ACR/CRIS による観測データを用いる。ACR/CRIS が観測した宇宙線の相対存在度を図 2.3 に示す。

以上が本研究で選択した地球・月近傍の銀河宇宙線のモデルである。月面の銀河宇宙線荷電粒子線量を計算していく上で、各荷電粒子の月面年間フルエンス $F_i(E_i)$ が必要不可欠となる。本研究では図 2.1 のエネルギースペクトルを 1 年間分時間積分することで年間の 4π フルエンスを得た。また月面側からの宇宙線 1 次成分の寄与はないものと考え、月面線量を計算する際はフルエンスの値に $1/2$ を乗じた。

2.2 太陽粒子線

太陽粒子線は突発的な太陽の爆発現象であるフレアに起因して放出され、大規模な太陽イベントが発生した場合、大量の陽子やその他の荷電粒子を放出することにより、月や地球近傍の放射線環境を一変させてしまう恐れがある。実際、磁気嵐や衛星機器の故障を起こす要因として太陽フレアは危険視されている。しか

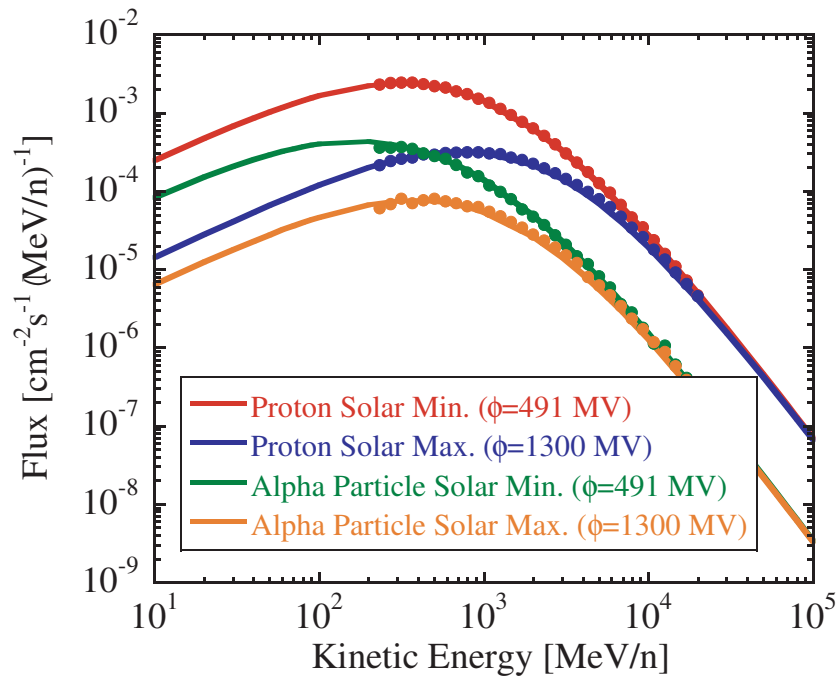


図 2.1: Shikaze らによる 1AU (地球近傍) における銀河宇宙線のエネルギースペクトル [5]。太陽活動に伴う変調係数 ϕ はそれぞれ極小期で 491 MV(1997 年)、極大期で 1300 MV(2000 年) である。プロットは実際の観測値を示す。

しこの現象は事前に予測することがたいへん困難であり、仮に大きな太陽イベントが発生した場合に予報や警告システム、ならびに放射線遮蔽の設備を強化させる以外に対処の方法がないのが現状である。

発生時期の予測が難しいだけでなく、その発生規模もイベントごとに異なるという厄介な面がある。つまり放出される粒子のフラックス、組成、放出の継続時間がイベントごとにまったく異なるのである [8]。図 2.4 に太陽イベントのエネルギーごとのフルエンスと黒点数を時系列で示す [9]。図 2.5 に過去に観測された大規模太陽粒子線のエネルギースペクトルを示す [8]。図 2.5 から分かるように、太陽粒子線のエネルギースペクトルは銀河宇宙線のそれとは異なり、たいへんソフトな形状をしているものが多い。イベントにより異なるが、数 10 MeV/n 程度のフルエンスは非常に高いが、数 1000 MeV/n まで高いフルエンスを保つイベントは稀である。この特徴から、太陽粒子線に起因する放射線量は銀河宇宙線に起因する放射線量に比べ遮蔽が容易であるという利点がある。しかし、太陽粒子線イベントの中には稀に高エネルギーにまで高フルエンスを保つタイプのももあり、そのような太陽フレアが発生した場合には遮蔽に十分注意が必要である [10]。こ

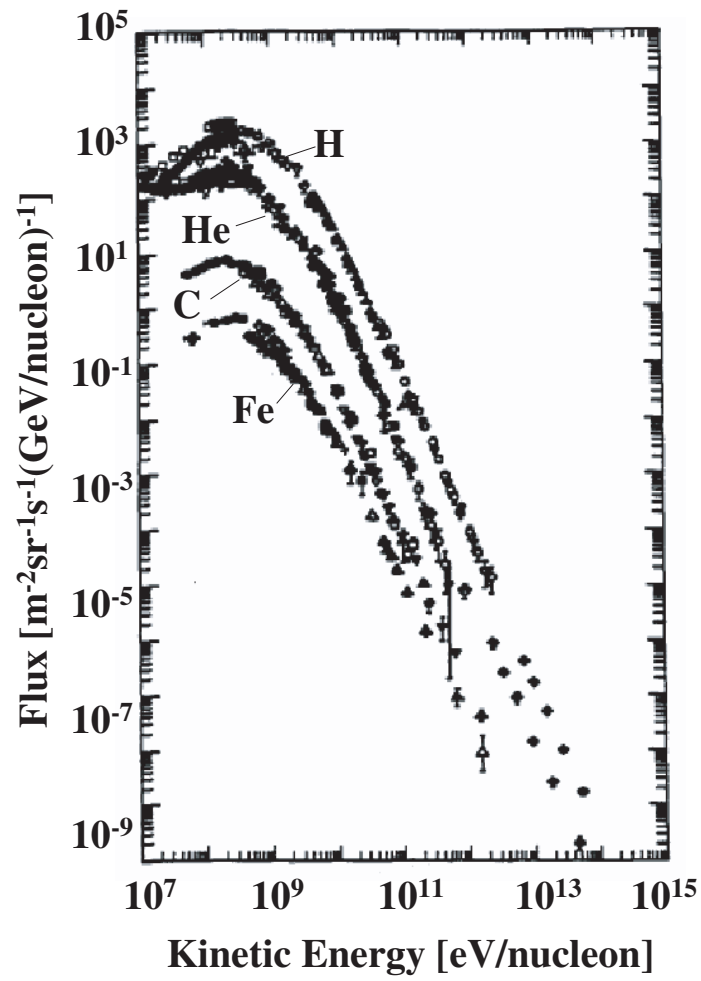


図 2.2: Mewaldt による陽子、ヘリウム核、炭素核、鉄核の地球近傍におけるエネルギースペクトル形状 [6]。

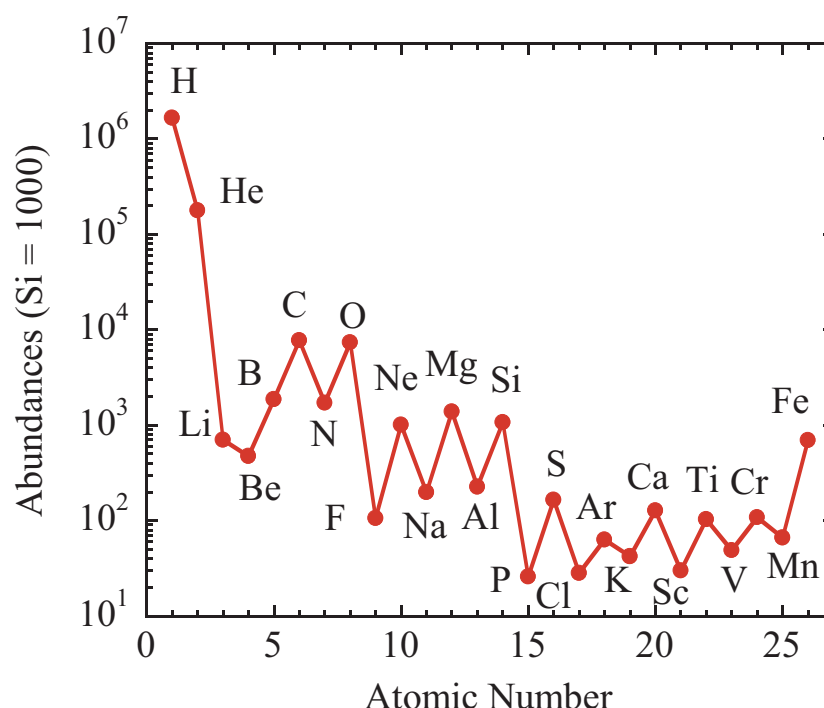


図 2.3: Israel らによる ACR/CRIS が観測した宇宙線の相対存在度 [7]。ケイ素を 1000 として規格化している。水素の存在度は Shikaze らの報告による BESS のエネルギースペクトル観測 [5] を積分して求めた。

のようにイベントごとに異なる太陽粒子線の放射線量を見積もる場合、さまざまなモデルを用いて各種の太陽イベントの線量を見ていく必要がある。

特に人体に大きな影響を与えるのは非常に特殊な大規模イベントである。太陽でこの大規模イベントが発生すると、月や地球近傍の放射線環境は一変する。地球ではこれらを Ground Level Enhancement (GLE) として特に重要視している。GLE が発生すると太陽近傍で加速された荷電粒子の影響が地球の各所に置かれている中性子モニターでも観測ができる。月軌道においても状況は地球と同じで、GLE の発生により月の放射線量は大きく増加する可能性がある。しかも、先に記したように月には大気や磁場がほとんどないため、太陽フレアにより放出された荷電粒子がそのまま直接月面に降り注ぐ。仮に長期にわたり月に滞在する月面居住者（作業従事者）が大規模な GLE イベントの影響を受けた場合、その被曝線量はたった一度のイベントで銀河宇宙線の年間線量を大きく上回る可能性もある。そのため、太陽粒子線は線量評価の面では欠かすことのできない重要な要素である。

太陽粒子線は太陽フレアやコロナ質量放出 (coronal mass ejections ; CME) と

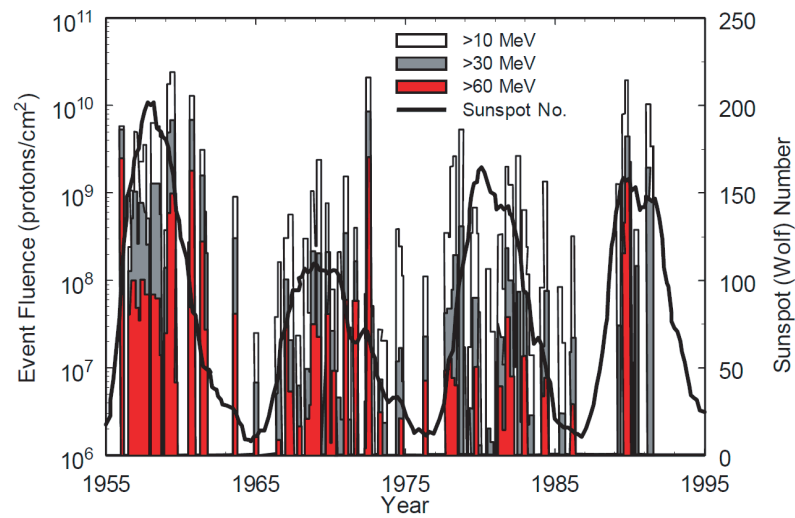


図 2.4: Reedy による太陽イベントのエネルギーごとのフルエンスと黒点数 [9]。

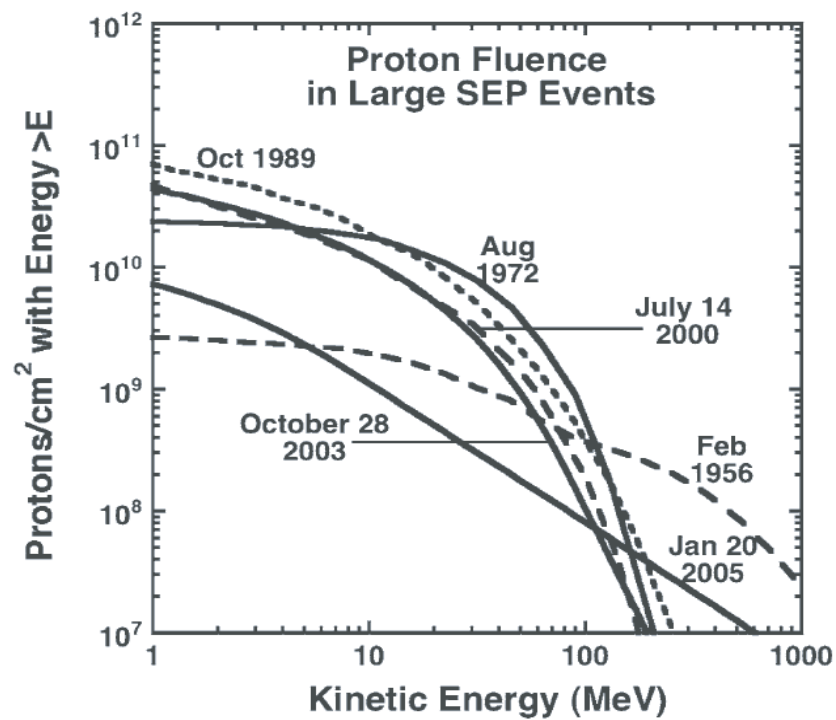


図 2.5: Mewaldt による過去に観測された地球近傍での大規模太陽粒子線のエネルギースペクトル [8]。

の関係が示唆されている [11, 12, 13]。一般に太陽粒子線の最大エネルギーは多くの場合、先にも記したように数 10 MeV/n であるが、ごく稀に数 GeV/n に到達するイベントも存在する。その頻度は予期し難いが、太陽活動周期に関係していることが分かっている。大規模な太陽イベントは 11 年間の太陽サイクル中に数回の頻度で発生し、特に太陽活動極大期の 2.5 年前から 4.5 年後までに集中している [14]。太陽粒子線の化学組成は太陽の組成を中心に分布する。太陽粒子線の中でも最も存在度が高いのは一般的には陽子成分である。それに比べ、重粒子各成分の存在度は非常に低い。継続時間に関しては数時間から数日に及ぶ幅広いタイプがある。

本研究では図 2.6 に示す大規模 GLE イベントの太陽粒子線陽子線量を計算した。それぞれ、1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日の計 6 つのイベントである。図 2.6 から分かるようにエネルギースペクトル形状が様々で、高エネルギー領域まで高いフルエンスを保つ 2005 年や 1956 年のような珍しいイベントも計算対象として含む。それぞれのイベントのモデル式は過去の先行研究により与えられている。1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日のイベントに関しては Timothy et al. [15] を、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日に関しては Xapsos et al. [16] を、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日に関しては Mewaldt [8] を参照した。

また陽子だけでなく、太陽粒子線重粒子核成分のエネルギースペクトルも近年の ACE、SAMPEX、GOES-11 等の高精度観測により明らかになってきた。本研究では太陽粒子線陽子成分と重粒子核成分の線量を比較する目的で、最新の観測結果を用いて太陽粒子線重粒子核成分の線量計算も同時に行った。対象としたのは 2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日のイベントで、対象粒子は 2003 年 10 月 28 日のイベントに関してヘリウム核と酸素核を、2005 年 1 月 20 日のイベントに関してはヘリウム核と酸素核、鉄核の線量を計算した。それらの重粒子成分のエネルギースペクトルをそれぞれ図 2.7、図 2.8 に示す [8]。以上が本研究で選択した地球・月近傍の太陽粒子線のモデルである。銀河宇宙線同様、各荷電粒子の月面年間フルエンスが線量計算には必要となる。本研究では月面線量を計算する際に月面方向からの寄与を差し引く目的で図 2.6、図 2.7、図 2.8 のフルエンスの値に $1/2$ を乗じて月面太陽粒子フルエンスを得た。

2.3 その他の宇宙線一次成分

月の表面で人体や計器に影響を及ぼす放射線一次成分は銀河宇宙線と太陽粒子線だけではない。月近傍の一次宇宙線は大きく次の 4 つに分類でき、それぞれエネルギーやフラックスが異なっている。2.1 章で扱った高エネルギー銀河宇宙線

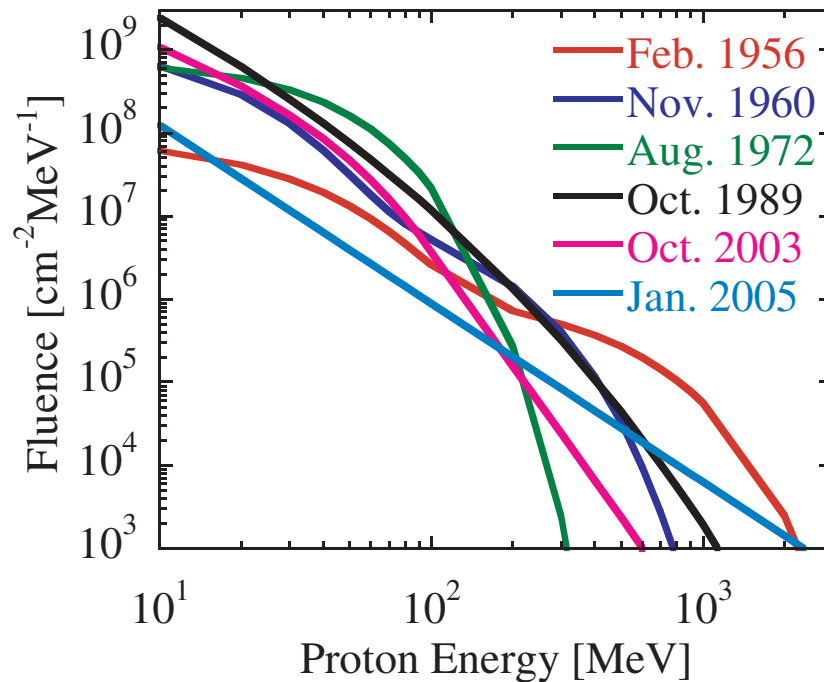


図 2.6: 本研究で対象とした 6 つの太陽イベントの地球近傍での陽子フルエンス。

は、フラックスが約 $1 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($0.1 \sim 10 \text{ GeV/n}$) で、透過深度は最大数メートルに達する。2.2 章で扱った高エネルギー太陽粒子線は、ほとんどがエネルギー 100 MeV/n 未満で、フラックスは最大 $100 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し、透過深度は約 1 cm である。

その他の宇宙線異常成分 (ACR) は、銀河宇宙線エネルギーのうち最もエネルギーの低い部分 (数 10 MeV/n 以下) であり、主として陽子、ヘリウム、酸素、窒素、ネオン、アルゴンイオンから成り、透過深度は約 1 cm 以下である。しかし数 10 MeV/n 以下の放射線はほとんどすべてが皮膚表層で止まってしまう。よって周辺線量当量のようなある程度の深さを要する線量計算には適さない。

太陽風 (SW) 粒子は、そのエネルギーが低く (約 1 keV) 透過深度が小さいが、フラックスは大きく約 $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。太陽風粒子はエネルギーが低い、そのフラックスの大きさから月表面に与える影響は大きい。事実、アポロ宇宙飛行士が月面で太陽風に曝した金属片を持ち帰り、太陽風の元素組成や同位体組成を直接観測する実験が行われた [17]。しかし、太陽風粒子も人体の内部に入り込んで組織や臓器に影響を与えるほどのエネルギーは持っていないため本研究では計算対象から省いた。

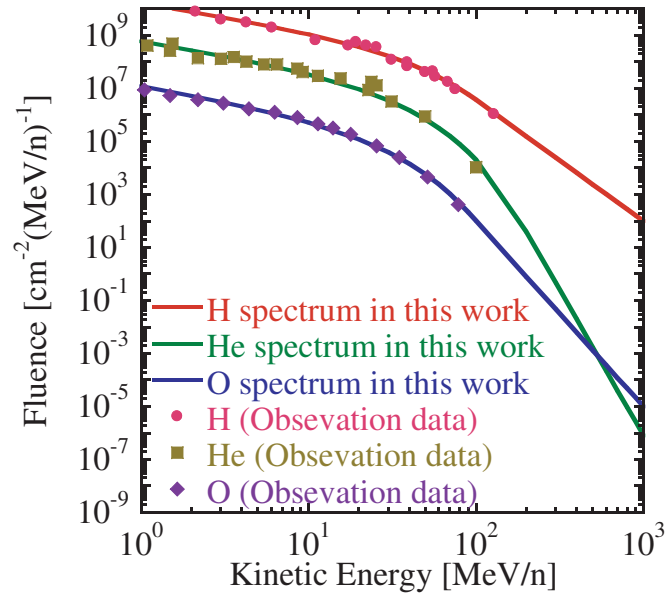


図 2.7: Mewaldt による 2003 年の大規模太陽イベントの陽子、ヘリウム核、酸素核の地球近傍におけるエネルギースペクトルモデル [8]。

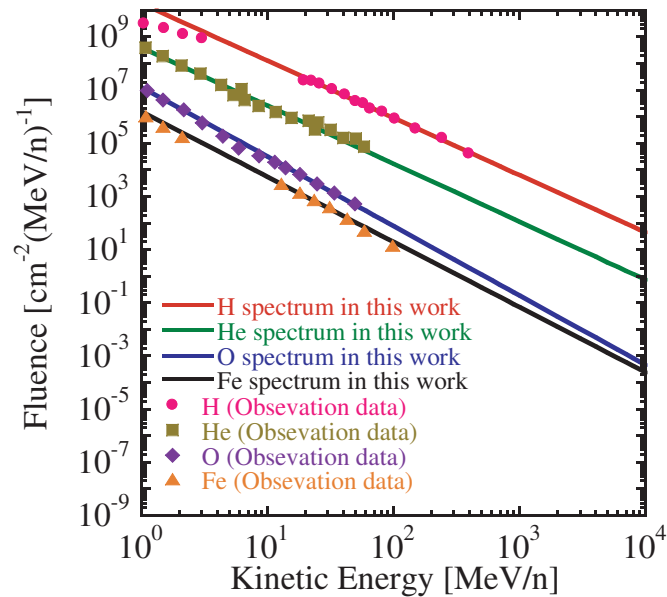


図 2.8: Mewaldt による 2005 年の大規模太陽イベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、鉄核の地球近傍におけるエネルギースペクトルモデル [8]。

2.4 二次中性子とガンマ線

月には地球のような厚い大気や磁場がなく、そのため宇宙線の高エネルギー荷電粒子は直接月面に降り注ぐ。月表層に照射されるこれらの宇宙線荷電粒子は月物質と相互作用して、高いエネルギーを持つ高速中性子を大量に発生させる。これら高速中性子そのまま月表面に漏洩してくる場合もあれば、高速中性子が月物質中でエネルギーを落とし、よりエネルギーの低い熱中性子、熱外中性子として漏洩してくる場合もある。さらに月表層で生成された高速中性子は月物質と非弾性散乱を起こし、大量のガンマ線を発生させる。また、エネルギーを落とした熱中性子は月表層物質の元素と中性子捕獲反応を起こし、これによりさらにガンマ線が発生する。図 2.9 に月面物質と宇宙線との相互作用による二次粒子発生概念図を記す。

また、図 2.9 に示されているように、月表層には地球同様カリウム、トリウム、ウランのような天然放射性元素が存在することが過去の観測により明らかになっている [19]。このように月表面の放射線環境は非常に複雑な過程の元に成り立っているのである。月面の放射線環境における主要な成分は直接降り注ぐ銀河宇宙線や太陽粒子線などの荷電粒子であるが、それらが月面物質と相互作用することで生成される二次中性子やガンマ線の線量寄与も本研究では考慮する [18]。

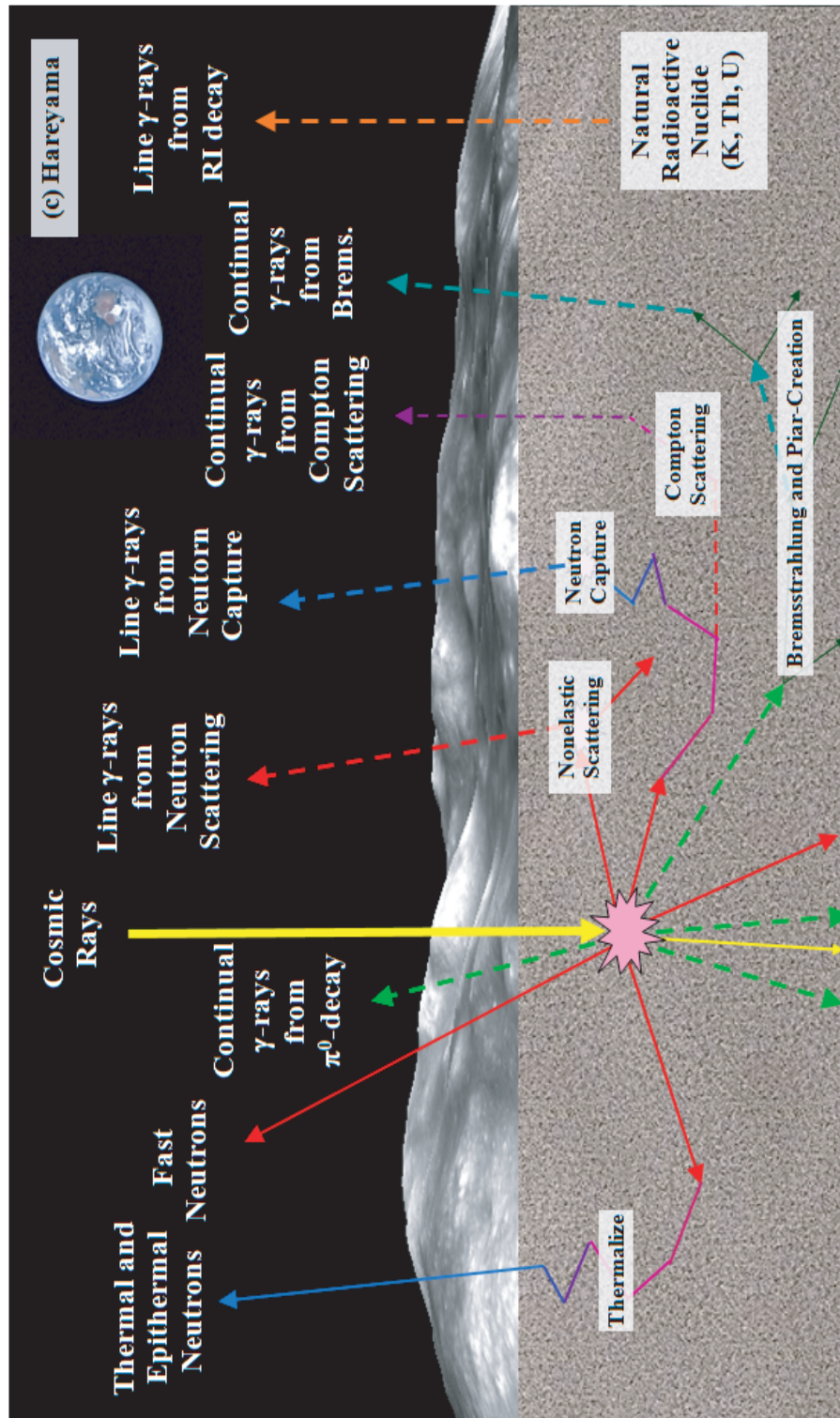


図 2.9: 月面物質と宇宙線との相互作用による二次粒子発生の概念図。

過去の月遠隔探査により、月面から漏洩する中性子やガンマ線のフラックスには地域差があることが分かっている。1998年打ち上げのアメリカの月探査衛星 Lunar Prospector が測った高速中性子の月面分布図を図 2.10 に示す [20]。Lunar Prospector の中性子分光計は 0.6 から 8 MeV までの高速中性子を 40 km の低高度で高度で観測している。また、2007年10月打ち上げの中国の月探査衛星 Chang'e-1 は搭載のガンマ線分光計 (CGRS) を用いて 0.55 から 0.75 MeV までの月面ガンマ線分布図を報告している。CGRS による高度 200 km の月面ガンマ線分布図を図 2.11 に示す [21]。フラックスと同様に月面の中性子、及びガンマ線の線量にも地域差がある。先行研究で報告された月のガンマ線周辺線量当量分布図を図 2.12 に示す [22]。図 2.12 は日本初の大型月周回衛星かぐや搭載のガンマ線分光計 (KGRS) による 100 km 高度観測から導かれた結果である。KGRS 観測時は太陽活動極小期であった。最も線量値が低いところでの年間ガンマ線周辺線量当量の値は 2.58 mSv/yr、最も線量値が高いところでは 4.30mSv/yr と報告されている。以上を踏まえ、本研究では比較のため月の海と高地の領域で線量計算を行った。

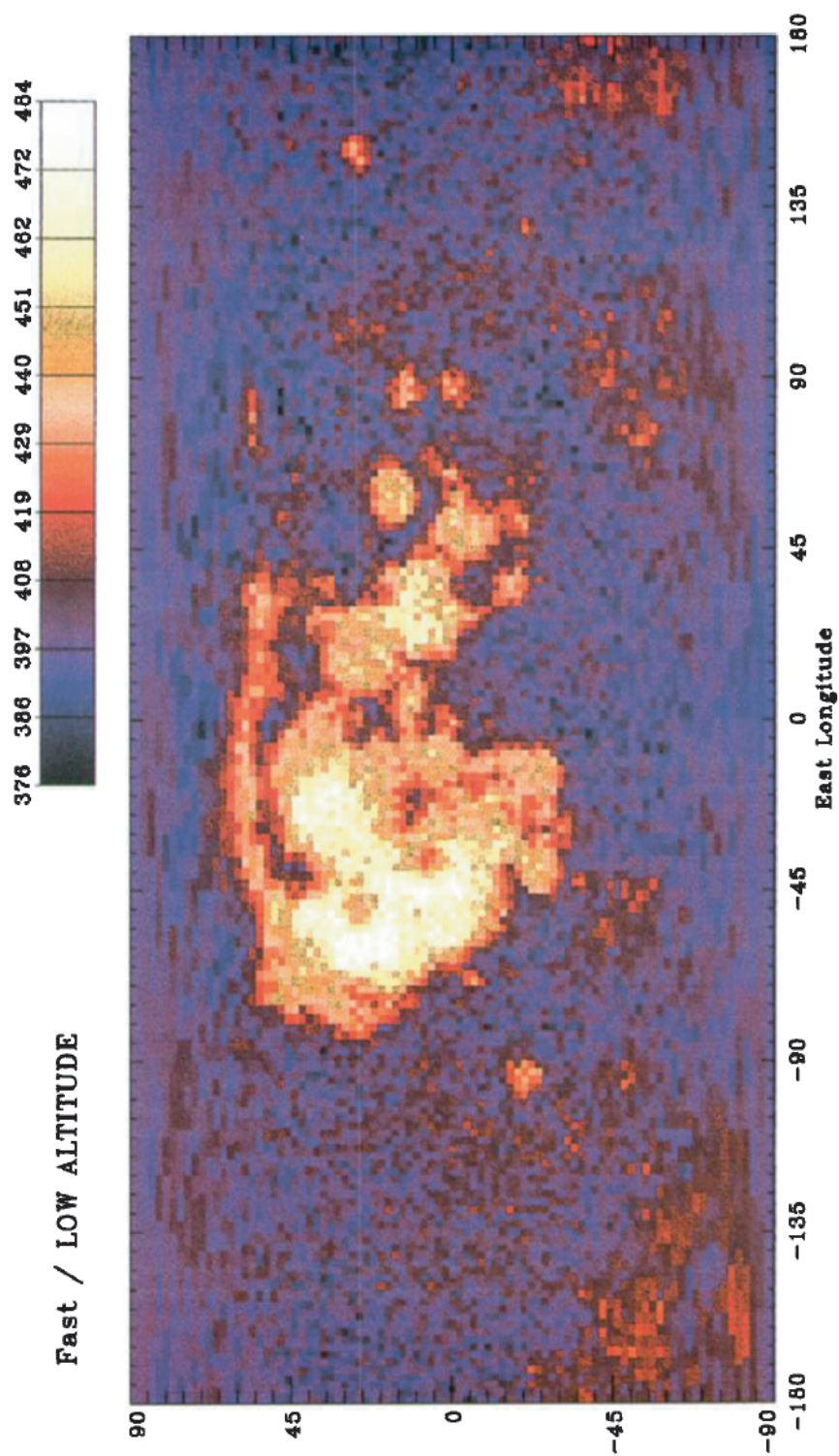
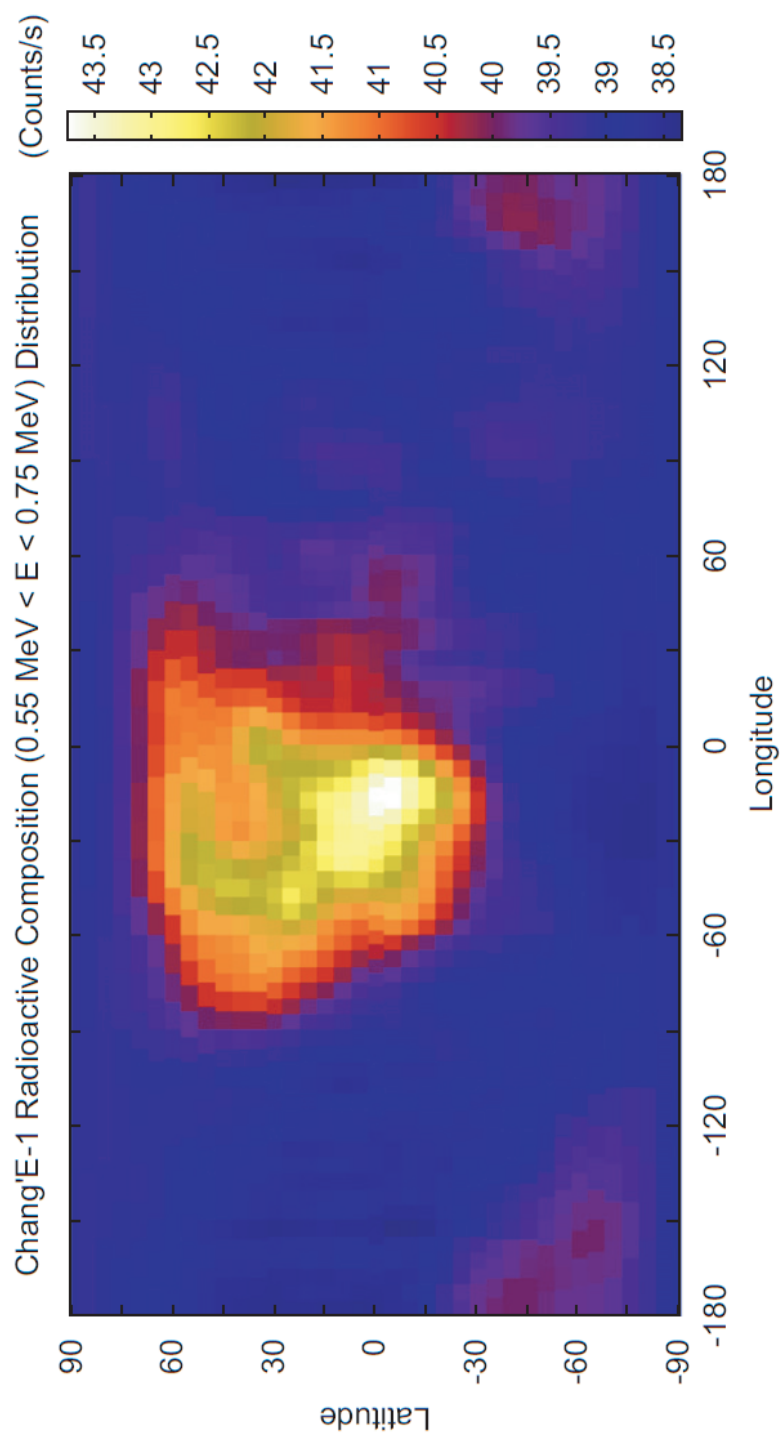


図 2.10: Maurice によって報告された Lunar Prospector 中性子分光計による高度 40 km の高速中性子 (0.6 - 8 MeV) 月面分布図 [20]。

図 2.11: Zhu らによって報告された CGRS による高度 200 km のガンマ線 ($0.55 - 0.75 \text{ MeV}$) 月面分布図 [21]。

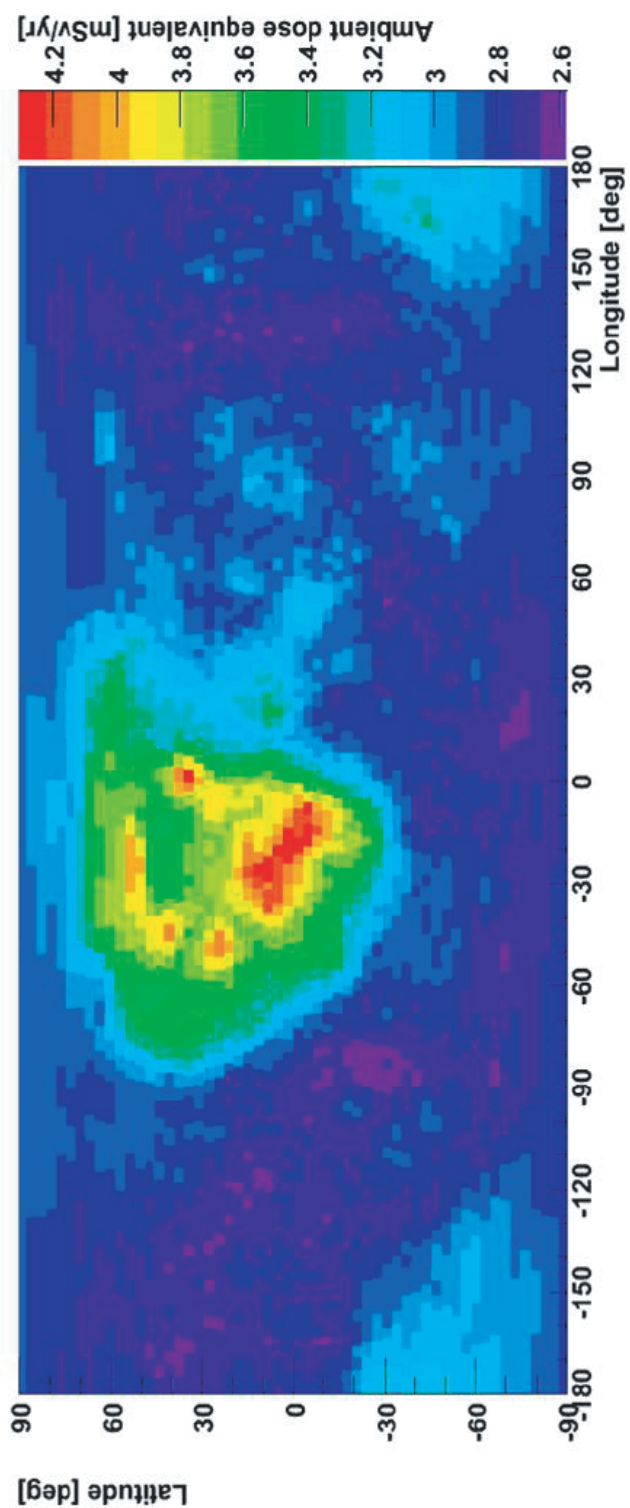


図 2.12: KGRS 高度 100 km 観測から導かれた月のガンマ線周辺線量当量分布図 [22]。

このように複雑な放射線の発生・輸送過程を取り扱うためには高度なモンテカルロ計算が必要となる。近年、高度なモンテカルロコードの発展が目覚ましく、それらを用いることで月の放射線環境のような複雑な過程を取り扱うことも可能になりつつある。

二次中性子及びガンマ線の年間線量を算出する上で重要なのは、月環境下におけるそれらの粒子の強度である。そこで本研究では Geant4 コード [23] を用いたモンテカルロシミュレーションを行い、宇宙線荷電粒子と月面物質との相互作用により生じる二次中性子やガンマ線の月面、及び月地下における強度を求めた。Geant4 とは、Geometry And Tracking version 4 の略で、多種多様な粒子と物質の相互作用や輸送を取り扱うモンテカルロシミュレーションのためのライブラリ群である [23]。計算に用いた Geant4 の version は、Geant4.9.0 である。電磁相互作用のモデルは Standard モデルを、ハドロン相互作用には理論ベースのモデリングを行うクオーク・グルーオンモデルに精度の高い核内カスケードモデルの Bertini カスケードを採用した QGSP_BERT_HP を使用した。さらに、このモデルは中性子の相互作用に、低エネルギー領域で高精度 (High Precision, HP) 評価済み断面積を使用している。断面積ライブラリの version は改良された G4NDL3.11 である [24]。

シミュレーション条件は以下の通りである。まず Geant4 を用いて月物質を模した $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$ の立方体の標的を用意し、ここに 10 MeV から 100 GeV までの銀河宇宙線陽子を照射した。ここで用いた銀河宇宙線陽子のエネルギースペクトルは BESS の観測結果 [5] をフィッティングして求めた表 2.1 のパラメータを式 2.1, 2.2, 2.3 に代入して得られたものである。ここで標的となる立方体は月の標準的な物質で構成されていることが望ましいが、生成される二次粒子のフラックスは月面物質の組成により多少の違いが生じる。月の海と呼ばれるエリアは高地と呼ばれるエリアに比べ質量数の大きな鉄やチタンといった元素が多く存在し、そのため高速中性子の発生量は海のエリアの方が多い。本研究では月の高地を代表する組成としてアポロ 16 号着陸地点のソイルの平均組成を、海を代表する組成としてアポロ 11 号着陸地点のソイルの平均組成を使用した [25]。アポロとルナの各着陸地点のソイルの平均組成を表 2.2 に示す。

Geant4 を用いて計算した二次中性子及びガンマ線の月面エネルギースペクトルをそれぞれ図 2.13、図 2.14 に示す。また、同様の手法で計算した二次中性子フラックスとガンマ線フラックスの深さ分布をそれぞれ図 2.15、図 2.16 に示す。図 2.13 から図 2.16 までは太陽活動極小期を想定して銀河宇宙線陽子を照射した際のエネルギースペクトル及びフラックスである。なお、本計算では月土壤中において中性子及びガンマ線の分布は等方的であると仮定している。中性子のエネルギー区分は、0.4 eV 以下を熱中性子、0.4 eV から 0.5 MeV までを熱外中性子、0.5 MeV

以上を高速中性子とした。図 2.13 から分かるように、表面における二次中性子のエネルギースペクトルの高地と海の差は熱中性子のエネルギー領域で大きい。しかし、線量に大きく影響するのはむしろ高速中性子のエネルギー領域であり [18]、月の表面においてこのエネルギー領域のフラックスは高地と海でほとんど変わらずその差は 8.6% 程度にとどまった。つまり、二次中性子線量の地域的な違いは表面を見る限りでは小さいであろうと予想できる。また、図 2.15 に示されるように全二次中性子フラックスがピークとなるのは月面地下 110-120 g/cm² 付近であった。線量に大きく寄与する高速中性子フラックスのピークは全フラックスのピークよりも浅いところに位置し、月面から約 70-80 g/cm² 程度深いところとなった。なお熱中性子フラックスの深さピークは 150-160 g/cm² の深さにあり、図 2.15 に示されるようにそのフラックスは海と高地で地域差が非常に大きい。これは場所によって大きな中性子捕獲断面積を持つ鉄やチタンといった元素の濃度に違いがあることに起因する。海の領域は玄武岩質な組成のため、表 2.2 に示すように鉄やチタンに富んでいる。また、ガンマ線フラックスの深さ分布は熱中性子に見られるような地域差がほとんどない（図 2.16 参照）。ピークとなる 90-100 g/cm² の深さ付近で、若干海領域のフラックスが高くなる程度である。なお、深さピークの位置における全中性子フラックスの強度と表面の全中性子フラックスの強度比は約 6 倍であり、高速中性子では約 3 倍、熱中性子では約 12 倍となった。またガンマ線フラックスにおける強度比は最高で約 4 倍となった。

表 2.2: Lucey らによるアポロの各着陸地点のソイルの平均組成 [25]。

| | Apollo 11 | Apollo 12 | Apollo 14 | Apollo 16 | Luna 16 | Luna 20 | Luna 24 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ [wt. %] | 42.0 | 46.1 | 47.7 | 44.9 | 44.3 | 45.2 | 44.8 |
| TiO ₂ [wt. %] | 7.5 | 2.7 | 1.7 | 0.59 | 3.4 | 0.49 | 1.1 |
| Al ₂ O ₃ [wt. %] | 13.5 | 12.6 | 17.4 | 26.7 | 15.6 | 22.8 | 11.8 |
| Cr ₂ O ₃ [wt. %] | 0.30 | 0.38 | 0.20 | 0.111 | 0.30 | 0.19 | 0.46 |
| FeO [wt. %] | 15.8 | 16.5 | 10.5 | 5.44 | 16.3 | 7.3 | 19.7 |
| MnO [wt. %] | 0.21 | 0.21 | 0.14 | 0.07 | 0.21 | 0.11 | 0.26 |
| MgO [wt. %] | 7.9 | 10.2 | 9.4 | 6.0 | 8.4 | 9.5 | 9.7 |
| CaO [wt. %] | 12.0 | 10.3 | 10.9 | 15.3 | 11.9 | 14.4 | 11.3 |
| Na ₂ O [wt. %] | 0.44 | 0.46 | 0.70 | 0.46 | 0.39 | 0.35 | 0.28 |
| K ₂ O [wt. %] | 0.14 | 0.24 | 0.52 | 0.121 | 0.11 | 0.07 | 0.03 |
| P ₂ O [wt. %] | 0.10 | 0.30 | 0.49 | 0.12 | 0.05 | 0.12 | 0.04 |

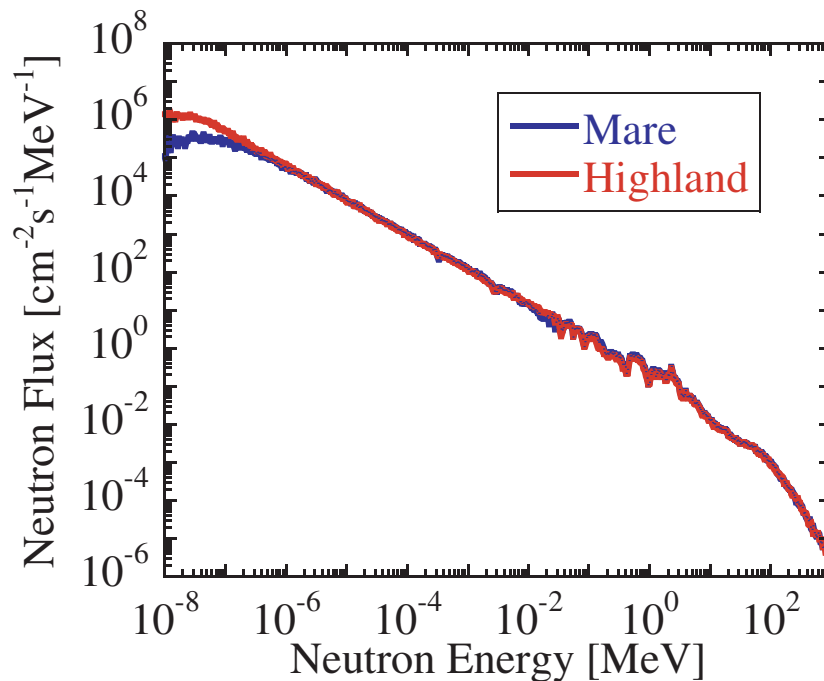


図 2.13: 銀河宇宙線陽子を照射した場合の月面における二次中性子のエネルギースペクトル。高地組成としてアポロ 16 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を、海の組成としてアポロ 11 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を用いた [25]。太陽活動は極小期を仮定した。

二次中性子及びガンマ線は銀河宇宙線陽子だけでなく銀河宇宙線ヘリウム核等重粒子核成分によっても生成される。その寄与を考慮に入れるため二次粒子の線量を求める際は、Denisov らの研究を参考に銀河宇宙線陽子を照射して得られた二次粒子フラックスを 1.5 倍した [26]

月面におけるガンマ線の発生機構は主に 2 つあり、1 つは月表層物質の相互作用により発生する中性子に起因するガンマ線である。この寄与については先に議論した。そしてもうひとつの発生機構として挙げられるのは地表元素に含まれるカリウム、トリウム、ウランなどの放射性崩壊によって生じるものである。本研究ではこのような天然放射性元素由来のガンマ線量も考慮した。

天然放射性元素由来のガンマ線量を見積もるために、まずは地球と月の地殻のトリウム濃度の比較を行った。地球では地殻の平均的な外部被曝線量は 0.48 mSv/yr [27] とされている。一方、地球の上部地殻の平均トリウム濃度は 3.5 ppm [28] と見積もられている。月地殻の平均トリウム濃度については様々な見解があり、現状ではまだ定まっていない。そこで本研究ではアポロのソイルサンプルから見

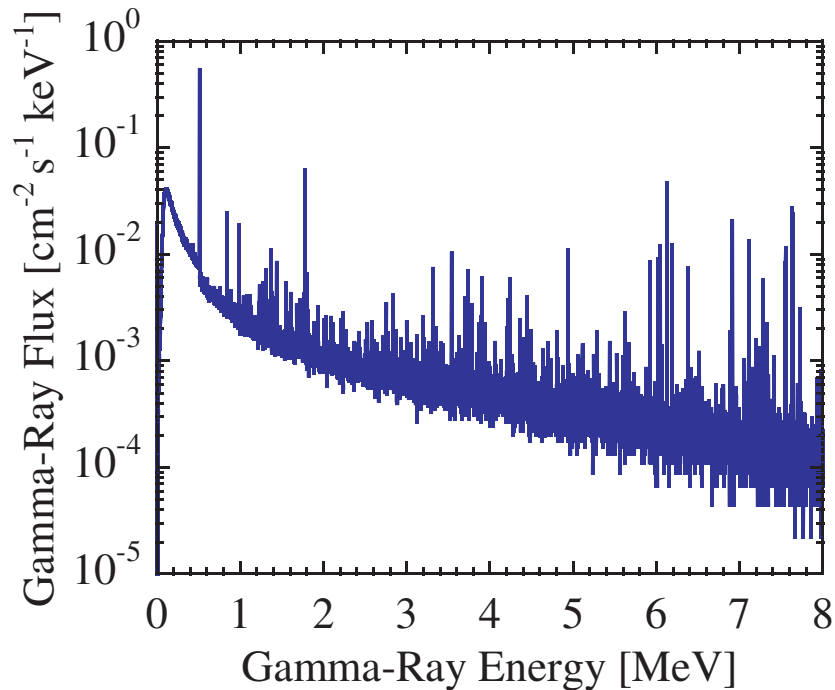


図 2.14: 銀河宇宙線陽子を照射した場合の月面におけるガンマ線エネルギースペクトル。太陽活動極小期・海領域におけるシミュレーション結果。

積もった。海の地域であるアポロ 11 号着陸地点の平均トリウム濃度は 1.9 ppm であり、高地の地域であるアポロ 16 号着陸地点の平均トリウム濃度は 2.0 ppm である [29]。そこで本研究では、この濃度をもとに天然放射性元素由来のガンマ線のフルエンスをモンテカルロ計算によって計算した。フルエンス計算には Geant4 コードを用いた。同様の手法でカリウム、ウランについてもフルエンス計算を行い、月地殻の特定の場所（アポロ着陸地点）における天然放射性元素のフルエンスを得た。

2.5 線量換算係数

防護量である実効線量当量、及び実効線量は人体中の各臓器・組織に対する線量を算出することで全身の線量を求める。したがって、人体中の臓器や組織をターゲットとして仮定してその中での放射線の生成・輸送を計算する必要がある。現在最新のモンテカルロ計算はこのような複雑な過程も扱うことが可能になった。

被曝線量の評価を簡単化するために各国、各機関が独自に放射線のフルエンス

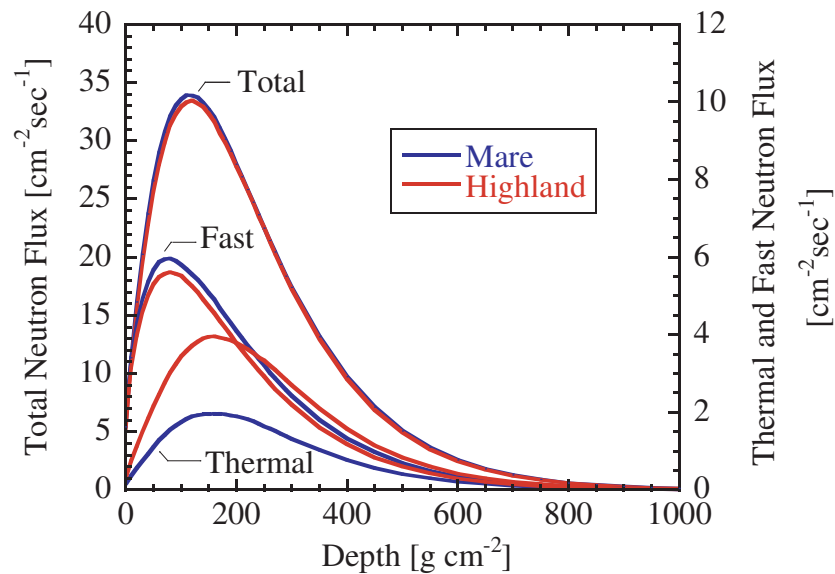


図 2.15: 銀河宇宙線陽子を照射した場合の二次中性子フラックスの深さ分布。高地組成としてアポロ 16 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を、海の組成としてアポロ 11 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を用いた [25]。太陽活動は極小期を仮定した。

から各線量に換算する換算係数を定めている。この換算係数の算出は使用するモンテカルロコードに依存するところが大きく、算出された換算係数にはそれぞれ違いがある。本研究では各粒子のスペクトルから実効線量当量、実効線量を求める計算のために、高度情報科学技術研究機構 (RIST)、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) などで開発が進められた粒子・重粒子輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [30] を用いて算出された換算係数を使用した。これらは航空機乗組員線量率の算出にも使用されているものである。

特に実効線量換算係数は 2007 年の ICRP Publication 103 [31] で改訂された放射線荷重 w_R 、及び組織荷重係数 w_T を用いて詳細な計算がなされている。実在の人物の医学的イメージデータに基づく基準ボクセルファントムモデルを使用し、2007 年の ICRP 勧告に基づく放射線荷重 w_R 、及び組織荷重係数 w_T を組み込んだ最新の陽子実効線量換算係数 [32] を表 2.3 に、中性子実効線量換算係数 [32] を表 2.4 に重粒子成分の実効線量換算係数 [33] を図 2.17 にまとめる。計算条件は陽子、中性子に対しては PHITS version 2.14 を使用し、重粒子核成分 (ヘリウム核からニッケル核まで) には PHITS version 2.15 を使用している。核反応のモデルは以

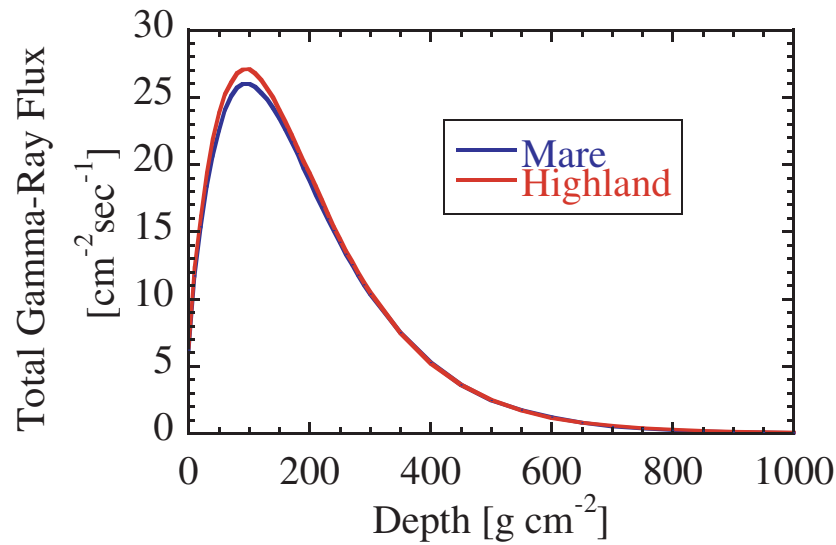


図 2.16: 銀河宇宙線陽子を照射した場合のガンマ線フラックスの深さ分布。高地組成としてアポロ 16 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を、海の組成としてアポロ 11 号着陸地点のソイルサンプルの平均値を用いた [25]。太陽活動は極小期を仮定した。

下の通りである。陽子と中性子は 5 GeV/nucleon 未満のエネルギー領域において JQMD モデル [34] を、それ以上の高エネルギー領域において JAM モデル [35] を使用している。重粒子成分については、JQMD モデルと JAM モデルを組み合わせ使用している。JQMD モデルの精度の高さは先行研究により実証されている [36, 37]。計算に使用されたターゲットは ICRP の基準ボクセルファントムモデルで、成人男性モデルとして身長 176 cm、体重 70 kg を仮定し、成人女性モデルとして身長 167 cm、体重 59 kg を仮定している。内部臓器、器官は 52 個である [32, 33]。照射粒子のエネルギー領域は表 2.3、表 2.4、図表 2.17 から分かるように対象粒子により異なる。ここで示すターゲットのジオメトリは前面から後面に向かって照射する anterior-to-posterior (AP)、等方的に照射する isotropic (ISO)、後面ろから前面に向けて照射する posterior-to-anterior (PA) となっている。

本研究で使用した実効線量換算係数の特徴として、ICRP の基準ファントムを使用していることがあげられる。ファントムの違いは換算係数の違いを生み出す要因の一つとして問題視されている [32] ため、統一された基準ファントムを用いた換算係数の整備が重要である。また計算コードの違いも換算係数の違いを生み出す要因となる。これらの違いは、特に実効線量換算係数に関しては高エネルギー領域もしくは低エネルギー領域の値の違いとして現れることが報告されている [32]。

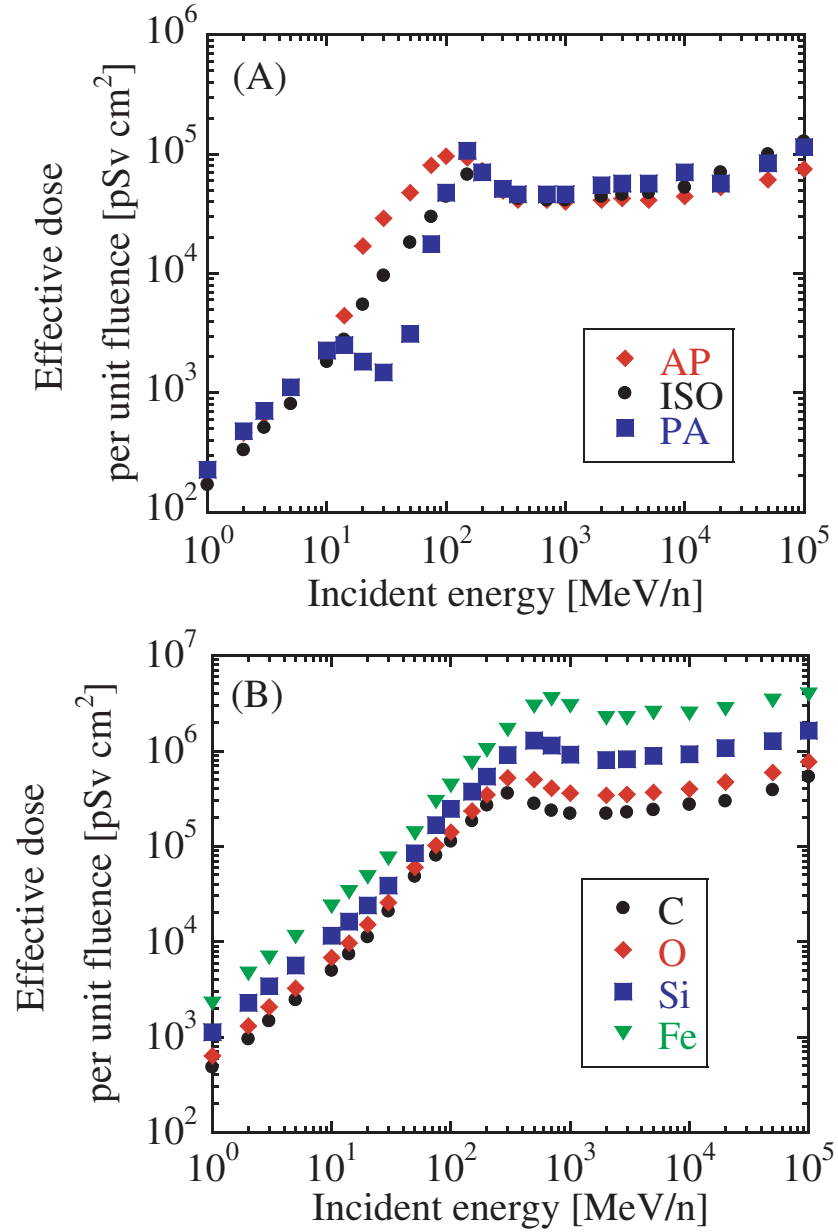


図 2.17: (A) 本研究で使用したヘリウム核に対する実効線量換算係数 [33]。ジオメトリは AP、ISO、PA。(B) 本研究で使用した炭素核、酸素核、ケイ素核、鉄核に対する実効線量換算係数 [33]。ジオメトリは ISO。

表 2.3: 本研究で使用した陽子実効線量換算係数とその標準偏差 [32]。

| Energy (MeV) | AP | | ISO | | PA | |
|--------------|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|
| | (pSv cm ²) | (%) | (pSv cm ²) | (%) | (pSv cm ²) | (%) |
| 1 | 5.45 | 0.1 | 4.03 | 0.7 | 5.46 | 0.0 |
| 2 | 10.9 | 0.1 | 8.02 | 0.6 | 10.9 | 0.0 |
| 3 | 16.4 | 0.0 | 12.3 | 0.7 | 16.4 | 0.1 |
| 5 | 27.3 | 0.1 | 20.9 | 1.1 | 27.3 | 0.1 |
| 10 | 54.5 | 0.1 | 44.5 | 1.1 | 54.6 | 0.1 |
| 14 | 111 | 0.2 | 70.5 | 1.0 | 64.1 | 0.0 |
| 20 | 428 | 0.6 | 136 | 1.6 | 43.6 | 0.1 |
| 30 | 743 | 0.5 | 248 | 1.7 | 36.0 | 0.1 |
| 50 | 1174 | 0.4 | 449 | 1.1 | 70.6 | 0.2 |
| 75 | 2026 | 0.2 | 752 | 0.6 | 438 | 0.2 |
| 100 | 2506 | 0.2 | 1134 | 0.3 | 1179 | 0.2 |
| 150 | 2386 | 0.2 | 1794 | 0.3 | 2823 | 0.2 |
| 200 | 1776 | 0.2 | 1847 | 0.3 | 1935 | 0.2 |
| 300 | 1387 | 0.2 | 1437 | 0.2 | 1459 | 0.2 |
| 500 | 1190 | 0.2 | 1202 | 0.3 | 1266 | 0.3 |
| 700 | 1166 | 0.2 | 1191 | 0.4 | 1246 | 0.2 |
| 1000 | 1133 | 0.3 | 1182 | 0.4 | 1244 | 0.3 |
| 2000 | 1167 | 0.3 | 1254 | 0.5 | 1291 | 0.3 |
| 3000 | 1217 | 0.3 | 1315 | 0.4 | 1349 | 0.3 |
| 5000 | 1217 | 0.5 | 1409 | 0.7 | 1362 | 0.5 |
| 10000 | 1338 | 0.4 | 1681 | 0.6 | 1574 | 0.5 |
| 20000 | 1523 | 0.7 | 2140 | 0.6 | 1855 | 0.5 |
| 50000 | 1876 | 0.5 | 2921 | 0.6 | 2386 | 0.5 |
| 100000 | 2309 | 0.7 | 4028 | 0.6 | 3056 | 0.5 |

また、実効線量当量換算係数に関しても PHITS コードを使用して計算されたものを使用した。本研究で使用した実効線量当量換算係数は ICRP Publication 60 [38] に基づくものである。使用した実効線量当量換算係数を図 2.18 に示す。

表 2.4: 本研究で使用した中性子実効線量換算係数とその標準偏差 [32]。

| Energy (MeV) | AP | | ISO | | PA | |
|----------------------|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|
| | (pSv cm ²) | (%) | (pSv cm ²) | (%) | (pSv cm ²) | (%) |
| 2.5×10^{-8} | 3.92 | 0.4 | 1.70 | 0.8 | 2.33 | 0.4 |
| 1×10^{-7} | 5.09 | 0.4 | 2.20 | 0.6 | 3.18 | 0.4 |
| 1×10^{-6} | 7.04 | 0.3 | 3.12 | 0.6 | 4.69 | 0.3 |
| 1×10^{-5} | 7.80 | 0.3 | 3.50 | 0.4 | 5.37 | 0.2 |
| 1×10^{-4} | 7.74 | 0.3 | 3.51 | 0.5 | 5.52 | 0.3 |
| 0.001 | 7.61 | 0.3 | 3.48 | 0.5 | 5.54 | 0.2 |
| 0.01 | 9.28 | 0.4 | 4.19 | 0.8 | 6.74 | 0.7 |
| 0.02 | 12.4 | 0.3 | 5.72 | 0.8 | 8.84 | 0.5 |
| 0.05 | 23.3 | 0.3 | 10.5 | 0.7 | 15.7 | 0.4 |
| 0.1 | 42.2 | 0.2 | 18.7 | 0.5 | 25.9 | 0.4 |
| 0.2 | 79.7 | 0.2 | 34.8 | 0.5 | 42.5 | 0.4 |
| 0.5 | 180 | 0.1 | 77.4 | 0.4 | 85.7 | 0.3 |
| 1 | 289 | 0.2 | 126 | 0.4 | 129 | 0.3 |
| 2 | 411 | 0.1 | 205 | 0.3 | 242 | 0.2 |
| 3 | 457 | 0.1 | 248 | 0.3 | 302 | 0.1 |
| 5 | 493 | 0.1 | 294 | 0.2 | 361 | 0.1 |
| 10 | 498 | 0.1 | 329 | 0.2 | 400 | 0.1 |
| 14 | 500 | 0.1 | 346 | 0.2 | 421 | 0.1 |
| 20 | 495 | 0.1 | 367 | 0.2 | 438 | 0.1 |
| 30 | 448 | 0.6 | 365 | 0.9 | 422 | 0.6 |
| 50 | 397 | 0.7 | 357 | 1.1 | 405 | 0.7 |
| 75 | 386 | 0.7 | 373 | 0.9 | 406 | 0.7 |
| 100 | 384 | 0.8 | 381 | 1.2 | 421 | 0.8 |
| 150 | 380 | 0.8 | 417 | 0.9 | 457 | 0.7 |
| 200 | 359 | 0.7 | 432 | 0.9 | 459 | 0.6 |
| 300 | 362 | 0.8 | 438 | 0.8 | 446 | 0.7 |
| 500 | 443 | 0.7 | 517 | 1.2 | 539 | 0.7 |
| 700 | 515 | 0.6 | 627 | 1.0 | 648 | 0.7 |
| 1000 | 558 | 0.6 | 674 | 0.9 | 707 | 0.8 |
| 2000 | 663 | 0.5 | 819 | 0.8 | 824 | 0.6 |
| 3000 | 697 | 0.5 | 903 | 0.7 | 880 | 0.5 |
| 5000 | 704 | 0.8 | 984 | 1.0 | 929 | 0.8 |
| 10000 | 852 | 0.8 | 1335 | 0.9 | 1133 | 0.7 |
| 20000 | 1029 | 0.7 | 1831 | 0.8 | 1451 | 0.7 |
| 50000 | 1418 | 0.8 | 2807 | 0.8 | 2092 | 0.6 |
| 100000 | 1976 | 0.7 | 4246 | 0.8 | 2923 | 0.7 |

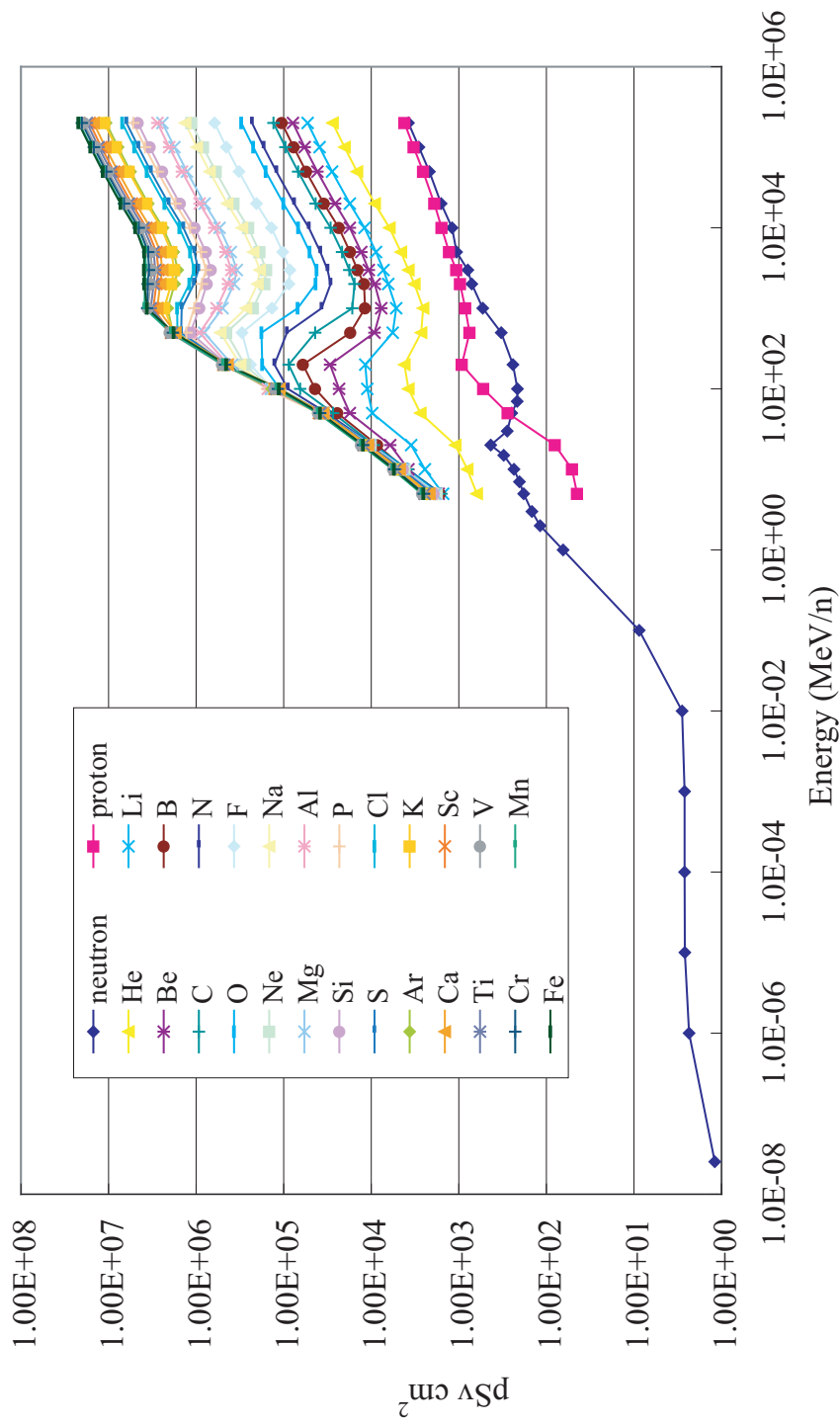


図 2.18: 本研究で使用した実効線量当量換算係数。

2.6 計算手法

実用量である周辺線量当量と防護量である実効線量当量、実効線量の計算方法は大きく異なる。ここではまずは周辺線量当量の計算手法について記述する。

周辺線量当量は測定可能な実用量であり、人体を模擬した物質中のある一点の線量を計算する。対象粒子が荷電粒子の場合、周辺線量当量は前章の式 1.2 で定義される。ここである放射線 R に対する吸収線量 D_R [Gy] は ICRU 球 [38] の一点における各放射線の質量阻止能と放射線 R のフラックスの積としてあらわされる。本研究では Ahlen (1982) に基づく阻止能計算プログラム [39] を用いて計算した。ICRU 球の組成は組織等価物質とし、酸素 76.2%、炭素 11.1%、水素 10.1%、窒素 2.6% で構成した。サイズは半径 15 cm で、その比重は 1.0 g/cm^3 とした。周辺線量当量の定義に基づいて、線量計算をするポイントは放射線の入射方向に対向する半径上で球面から深さ 10 mm の点とした。太陽活動極小期と太陽活動極大期の月面銀河宇宙線強度を用いて計算した吸収線量の比較を図 2.19 に示す。図 2.3 で示した宇宙線存在度と比較すると、存在度の低い重粒子成分の吸収線量が比較的高いことが分かる。これは吸収線量が阻止能によって決まることに起因しており、阻止能が原子番号の二乗に比例することと大きく関係する。太陽活動の極小期と極大期では全体の吸収線量は約 3.7 倍も異なる。

本計算で荷電粒子放射線のフルエンスは銀河宇宙線に関しては 2.1 章で議論したものを太陽粒子線に関しては 2.2 章で議論したものを選択した。対象粒子は銀河宇宙線に関しては 10 MeV/n から 100 GeV/n までの陽子から鉄核までとし、エネルギースペクトルは太陽活動極小期モデルとして太陽変調パラメータが 491 MV のものを、太陽活動極大期モデルとして太陽変調パラメータが 1300 MV のものを採用した。それぞれ BESS の 1997 年観測と 2000 年観測の結果に基づく値である。ヘリウム核以上の銀河宇宙線重粒子核成分に関しては個々の粒子の詳細なエネルギースペクトル観測データは利用可能ではない。よって ACE/CRIS 観測の相対存在度を用いて、銀河宇宙線ヘリウム核のエネルギースペクトルを規格化し、フルエンスを求めた。太陽粒子線については 1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日の計 6 つの大規模イベントに対して陽子の周辺線量当量を計算し、重粒子核については 2003 年 10 月 28 日のイベントに関してヘリウム核と酸素核を、2005 年 1 月 20 日のイベントに関してはヘリウム核と酸素核、鉄核の周辺線量当量を計算した。太陽粒子線の照射エネルギーは 10 MeV/n から 100 MeV/n までとした。

銀河宇宙線に起因する周辺線量当量の中性子、ガンマ線成分の計算については、ICRP Publication 74 [38] に周辺線量当量換算係数が与えられている。本計算で用いた ICRP Publication 74 の中性子周辺線量当量換算係数 $C_{H^*(10)_N}$ とガンマ線周辺線量当量換算係数 $C_{H^*(10)_\gamma}$ をそれぞれ図 2.20、2.21 に示す。これらの換算係数

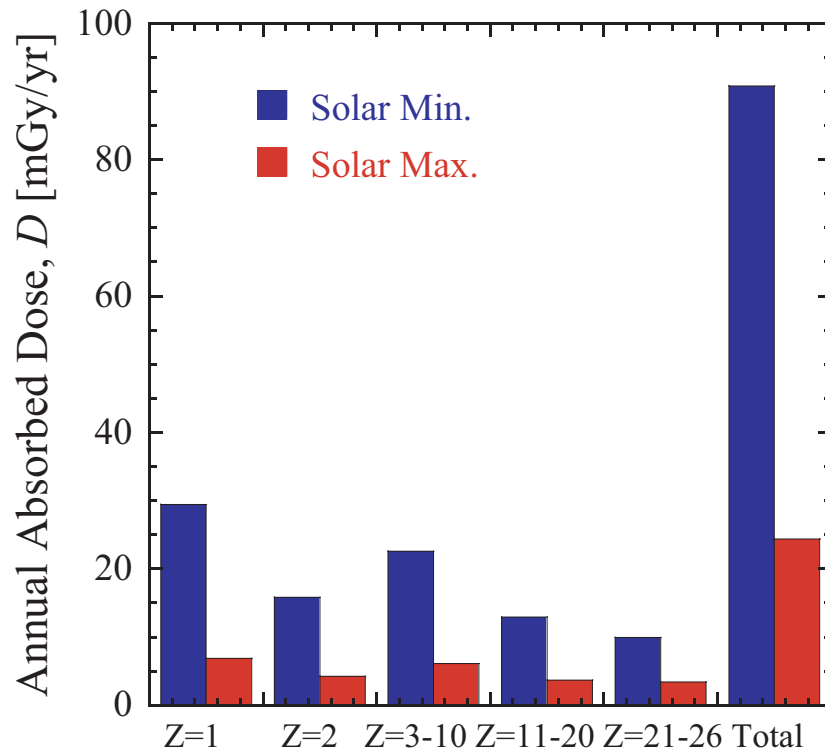


図 2.19: 太陽活動極小期と太陽活動極大期の月面銀河宇宙線強度を用いて計算した吸収線量の比較。

と2.4章で算出された Geant4 計算による月面、及び月地中の中性子、ガンマ線フルエンスを用いて周辺線量当量の中性子、ガンマ線成分をそれぞれ式 2.4、2.5 のように計算した。

$$H^*(10)_N = \int C_{H^*(10)_N}(E_N) \times F_N(E_N) dE_N, \quad (2.4)$$

$$H^*(10)_\gamma = \int C_{H^*(10)_\gamma}(E_\gamma) \times F_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma. \quad (2.5)$$

防護量である実効線量当量と実効線量の計算には2.5章で記した換算係数を用いた。各銀河宇宙線荷電粒子、太陽粒子線荷電粒子成分 i の実効線量当量 H_E 、実効線量 E はそれぞれ

$$H_{E,GCRorSEP_i} = \int C_{H,i}(E_i) \times F_i(E_i) dE_i, \quad (2.6)$$

$$E_{GCRorSEP_i} = \int C_{E,i}(E_i) \times F_i(E_i) dE_i, \quad (2.7)$$

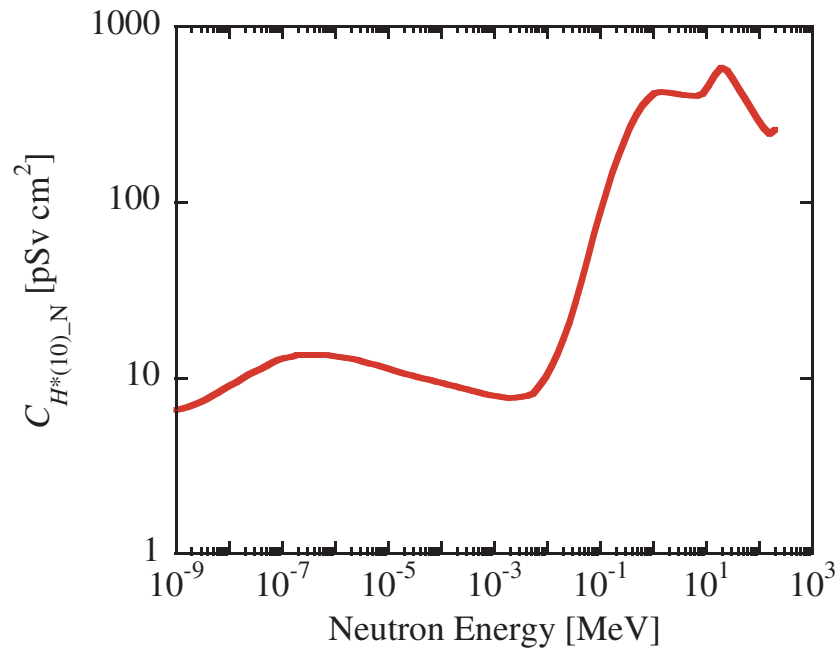


図 2.20: 本研究で使用した中性子周辺線量当量換算係数 [40]。

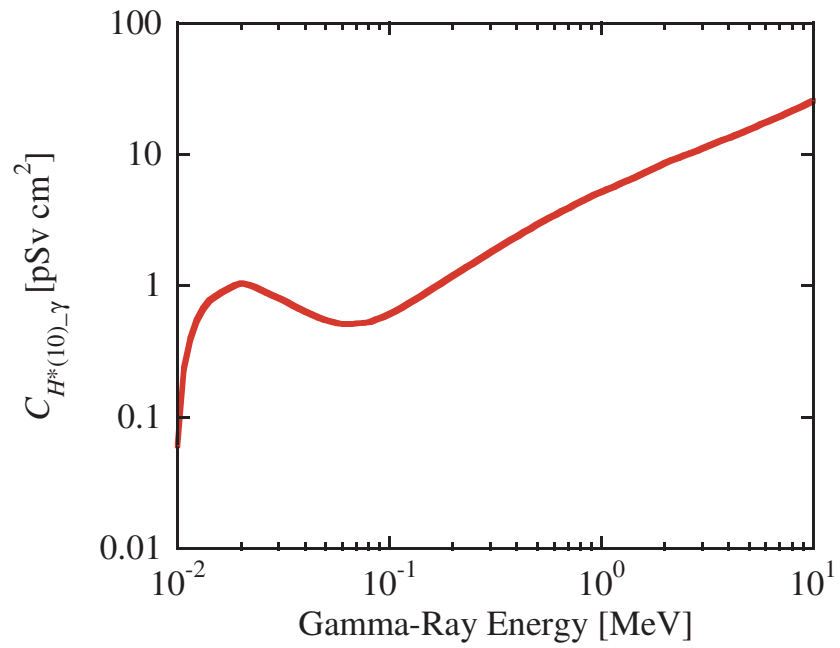


図 2.21: 本研究で使用したガンマ線周辺線量当量換算係数 [40]。

の式を用いて計算した。ここで、 F_i は周辺線量当量で使用了なものと同じ荷電粒子フルエンスで、 $C_{H,i}$ 、 $C_{E,i}$ はそれぞれ2.5章で記述した実効線量当量換算係数、実効線量換算係数 [32, 33] である。中性子に関してはそれぞれ中性子実効線量当量換算係数 $C_{H,N}$ 、中性子実効線量換算係数 $C_{E,N}$ [32] を用いて式2.4と同様に計算した。ガンマ線に関して実効線量換算係数は与えられていないため本研究では議論を省いた。なお、ガンマ線実効線量当量換算係数 $C_{H,\gamma}$ は宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部環境計測グループの込山立人氏からご提供いただいた。こちらでもPHITSコードを利用した換算係数となっている。

参考文献

- [1] Simpson, J. A., 1983, Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **33**, 323-381.
- [2] Derbina, V. A., Galkin, V. I., Hareyama, M., Hirakawa, Y., Horiuchi, Y., Ichimura, M., Inoue, N., Kamioka, E., Kobayashi, T., Kopenkin, V. V., Kuramata, S., Managadze, A. K., Matsutani, H., Misnikova, N. P., Mukhamedshin, R. A., Nagasawa, S., Nakano, R., Namiki, M., Nakazawa, M., Nanjo, H., Nazarov, S. N., Ohata, S., Ohtomo, H., Osedlo, V. I., Oshuev, D. S., Publichenko, P. A., Rakobolskaya, I. V., Roganova, T. M., Saito, C., Sazhina, G. P., Semba, H., Shibata, T., Shuto, D., Sugimoto, H., Suzuki, R., Sveshnikova, L. G., Taran, V.M., Yajima, N., Yamagami, T., Yashin, I. V., Zamchalova, E. A., Zatsepin, G. T., Zayarnaya, I. S., 2005, ECosmic-Ray Spectra and Composition in the Energy Range of 101000 TeV per Particle Obtained by the RUNJOB Experiment, *Astrophys. J.*, **628**, L41-L44.
- [3] Gleason, L. J. and Axford, W. I., 1967, Cosmic Rays in the Interplanetary Medium, *Astrophys. J.*, **154**, L115-L118.
- [4] Usoskin, I. G., Alanko Huotari, K., Kovaltsov, G. A. and Mursula. K., 2005, Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951-2004, *J. Geophys. Res.*, **110**, A12108.
- [5] Shikaze, Y., Haino, S., Abe, K., Fuke, H., Hams, T., Kim, K. C., Makida, Y., Matsuda, S., Mitchell, J. W., Moiseev, A. A., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, S., Ormes, J. F., Sanuki, T., Sasaki, M., Seo, E. S., Streitmatter, R. E., Suzuki, J., Tanaka, K., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., Yoshimura, T., 2007, Measurements of 0.2-20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer, *Astroparticle Phys.*, **28**, 154-167.
- [6] Mewaldt, R. A., 1994, Galactic cosmic ray composition and energy spectra, *Adv. Space Res.*, **14**, 10, 737-747.

-
- [7] Israel, M., Binns, W. R., Cummings, A. C., Leske, R. A., Mewaldt, R. A., Stone, E. C., von Rosenvinge, T. T., Wiedenbeck, M. E., 2005, Isotopic Composition of Cosmic Rays: Results from the Cosmic Ray Isotope Spectrometer on the ACE Spacecraft, *Nucl. Phys. A*, **758**, 201c-208c.
 - [8] Mewaldt, R. A., 2006, Solar energetic particle composition, energy spectra, and space weather, *Space Sci. Rev.*, **124**, 303-316.
 - [9] Reedy, R. C., 1996, Constraints on solar particle events from comparisons of recent events and million-year averages, *ASP Conference Series*, **95**, 429-436.
 - [10] Hayatsu, K., Hareyama, M., Kobayashi, S., Yamashita, N., Sakurai, K., Hasebe, N., 2009, HZE Particle and Neutron Dosages from Cosmic Rays on the Lunar Surface, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A*, **78**, 149-152.
 - [11] Reames, D. V., 1998, Solar Energetic Particles: Sampling Coronal Abundances, *Space Sci. Rev.*, **85**, 327-340.
 - [12] Reames, D. V., 1998, Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere, *Space Sci. Rev.*, **90**, 413-491.
 - [13] Cane, H. V., Mewaldt, R. A., Cohen, C. M. S., von Rosenvinge, T. T., 2006, Role of flares and shocks in determining solar energetic particle abundances, *J. Geophys. Res.*, **111**, A06S90.
 - [14] Kim, M.-H. Y., De Angelis, G., Cucinotta, F. A., 2011, Probabilistic assessment of radiation risk for astronauts in space missions, *Acta Astron.*, **68**, 747-759.
 - [15] Timothy, F. C. and Gautam, D. B., 1999, Comparison of the SPE model with proton and heavy ion data, *Rad. Meas.*, **30**, 251-259.
 - [16] Xapsos, M. A., Barth, J. L., Stassinopoulos, E. G., Messenger, S. R., Walters, R. J., Summers, G. P., Burke, E. A., 2000, Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **47**, 6, 2218-2223.
 - [17] 海老原充, 化学新シリーズ 太陽系の化学 - 地球の成り立ちを理解するために -, 裳華房 2006.

- [18] Hayatsu, K., Kobayashi, S., Yamashita, N., Hareyama, M., Sakurai, K. and Hasebe, N., 2007, Environmental Radiation Dose on the Moon, *Proc. 10th ICATPP Conference*.
- [19] Yamashita, N., Hasebe, N., Reedy, R. C., Kobayashi, S., Karouji, Y., Hareyama, M., Shibamura, E., Kobayashi, M. N., Okudaira, O., d'Uston, C., Gasnault, O., Forni, O., Kim K. J., 2010, Uranium on the Moon: Global distribution and U/Th ratio, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, 10, L10201.
- [20] Maurice, S., Feldman, W. C., Lawrence, D. J., Elphic, R. C., Gasnault, O., d'Uston, C., Genetay, I., Lucey, P. G., 2000, High-energy neutrons from the Moon, *J. Geophys. Res.*, **105**, E8, 20365-20375.
- [21] Zhu, M. -H., Ma, T., Chang, J., 2010, Chang'E-1 gamma ray spectrometer and preliminary radioactive results on the lunar surface, *Planetary and Space Science*, **58**, 1547-1554.
- [22] Y. Takeda, K. Hayatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Hasebe, S. Kodaira, K. J. Kim, 2010, The ambient dose equivalent from lunar gamma-rays observed by Kaguya gamma-ray spectrometer, *Advances in Geosciences*, **19**, 69-75.
- [23] Agostinelli, S., Allison, J., et al., 2003, Geant4 - a simulation toolkit, *Nucl. Inst. Meth.*, **A506**, 250-303.
- [24] Yamashita, N., Hasebe, N., Miyachi, T., Kobayashi, M., Okudaira, O., Kobayashi, S., Ishizaki, T., Sakurai, K., Miyajima, M., Reedy, R. C., d'Uston, C., Maurice, S. and Gasnault, O., 2008, Complexities of Gamma-Ray Line Intensities from the Lunar Surface, *Earth Planets Space*, **60**, 313-319.
- [25] Lucey, P., Korotev, R. L., Gillis, J. J., Taylor, L. A., Lawrence, D., Campbell, B. A., Elphic, R., Feldman, B., Hood, L. L., Hunten, D., Mendillo, M., Noble, S., Papike, J. J., Reedy, R. C., Lawson, S., Prettyman, T., Gasnault, O., Maurice, S., 2006, Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **60**, 83-219.

-
- [26] Denisov, A. N., Kuznetsov, N. V., Nymmik, R. A., Panasyuk, M. I., Sobolevsky, N. M., 2011, Assessment of the radiation environment on the Moon, *Acta Astron.*, **68**, 1440-1447.
- [27] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Pubns, New York.
- [28] Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Blackwell Scientific Publications, London.
- [29] McKay, D. S., Heiken, G., Basu, A., Blanford, G., Simon, S., Reedy, R., French, B., Papike, J. (1991) *The lunar regolith*, in: Heiken, G., Vaniman, D. and French, B. (Eds), *The Lunar Source Book: A user's guide to the Moon*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- [30] Niita, K., Matsuda, N., Iwamoto, Y., Iwase, H., Sato, T., Nakashima, H., Sakamoto, Y., Sihver, L., 2010. PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code system. Version 2.23, JAEA-Data/code.
- [31] International Commission on Radiological Protection (2007) *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annals of ICRP 37, 2-4*, Oxford: Pergamon Press.
- [32] Sato, T., Endo, A., Zankl, M., Petoussi-Henss, N., Niita, K., 2009, Fluence-to-dose conversion coefficients for neutrons and protons calculated using the PHITS code and ICRP/ICRU adult reference computational phantoms, *Phys. Med. Biol.*, **54**, 1997-2014.
- [33] Sato, T., Endo, A., Niita, K., 2010, Fluence-to-dose conversion coefficients for heavy ions calculated using the PHITS code and ICRP/ICRU adult reference computational phantoms, *Phys. Med. Biol.*, **55**, 2235-2246.
- [34] Niita, K., Chiba, S., Maruyama, T., Takada, H., Fukahori, T., Nakahara, Y., and Iwamoto, A., 1995, Analysis of the (N,xN') reactions by quantum molecular dynamics plus statistical decay model, *Phys. Rev.*, **C52**, 2620.
- [35] Nara, Y., Otuka, N., Ohnishi, A., Niita, K., and Chiba, S., 1999, Relativistic nuclear collisions at 10A GeV energies from p+Be to Au+Au with the hadronic cascade model, *Phys. Rev.*, **C61**, 024901.

- [36] Sato, T., Sihver, L., Iwase, H., Nakashima, H., and Niita, K., 1995, Simulation of an accelerator-based shielding experiment using the particle and heavy ion transport code system PHITS, *Adv. Space Res.*, **35**, 208-213.
- [37] Sihver, L., Mancusi, D., Sato, T., Niita, K., Iwase, H., Iwamoto, Y., Matsuda, N., Nakashima, H. and Sakamoto, Y., 2007, Recent developments and benchmarking of the PHITS code, *Adv. Space Res.*, **40**, 1320-1331.
- [38] International Commission on Radiological Protection (1991) *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21, 1-3*, Oxford: Pergamon Press.
- [39] Ahlen, S. P., 1980, Theoretical and experimental aspects of the energy loss of relativistic heavily ionizing particles, *Rev. Mod. Phys.*, **52**, 121-173.
- [40] International Commission on Radiological Protection (1997) *ICRP Publication 74: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation 74*, Elsevier, Oxford.

第3章 月の放射線量計算結果

本章では前章で記した月の宇宙線環境のモデルと計算条件をもとに計算した月の放射線量計算結果をまとめる。対象は銀河宇宙線、太陽粒子線、二次中性子、ガンマ線である。実用量である周辺線量当量と防護量である実効線量当量、及び実効線量の計算結果をそれぞれまとめる。また放射線防護の観点からアルミニウムや月レゴリスを遮蔽材として用いた時のシールド効果を見積もる。

表 3.1: 太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地の年間周辺線量当量。

| | Ambient Dose Equivalent [mSv/yr] | | | |
|------------|----------------------------------|----------|---------------|----------|
| | Solar Minimum | | Solar Maximum | |
| | Mare | Highland | Mare | Highland |
| GCRs | 677.7 | | 178.5 | |
| Neutrons | 94.9 | 86.3 | 29.4 | 27.8 |
| Gamma Rays | 2.9 | 2.8 | 1.1 | 1.0 |
| total | 775.5 | 766.8 | 209.0 | 207.4 |

3.1 銀河宇宙線に起因する月表面線量

銀河宇宙線は太陽活動の周期変動に伴うエネルギースペクトルの変調を受けながらも恒久的に月面に降り注ぐ成分である。3.1 章では一次成分としての銀河宇宙線荷電粒子とそれに起因する二次中性子、中性子誘導ガンマ線、天然放射性元素由来のガンマ線の線量を年間線量として計算する。なお、3.1 章の計算では遮蔽は考慮しない。

3.1.1 周辺線量当量

月面の年間周辺線量当量 $H^*(10)$ を式 3.1 のように定義する。

$$H^*(10) = H^*(10)_{\text{GCR}} + H^*(10)_{\text{N}} + H^*(10)_{\gamma}. \quad (3.1)$$

ここで $H^*(10)_{\text{GCR}}$ は銀河宇宙線荷電粒子成分の年間周辺線量当量、 $H^*(10)_{\text{N}}$ は二次中性子の年間周辺線量当量、 $H^*(10)_{\gamma}$ は中性子誘導ガンマ線、及び天然放射性元素由来のガンマ線の年間周辺線量当量である。それぞれの計算手法、計算条件は2章に記した。

太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地それぞれの年間周辺線量当量を表 3.1 に示す。太陽活動による線量差は海、高地共に 3.7 倍と大きい。逆に地域差は小さく 1%程度となった。

表 3.1 に示すように年間周辺線量当量のワーストケースは太陽活動極小期の海領域における線量でその値は年間約 780 mSv/yr であった。海における周辺線量当量の内訳を図 3.1 に示す。

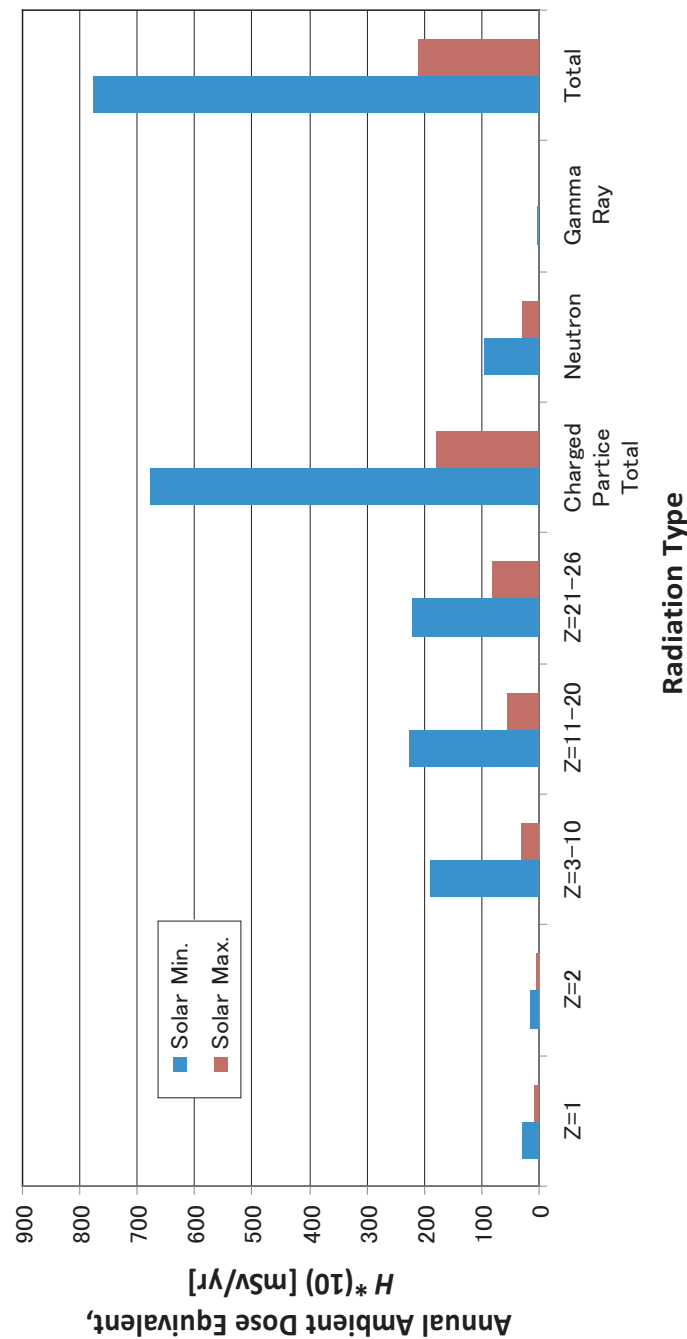


図 3.1: 海における周辺線量当量の内訳。

3.1.2 実効線量当量

月面の年間実効線量当量 H_E を式 3.2 のように定義する。

$$H_E = H_{E,GCR} + H_{E,N} + H_{E,\gamma}. \quad (3.2)$$

ここで $H_{E,GCR}$ は銀河宇宙線荷電粒子成分の年間実効線量当量、 $H_{E,N}$ は二次中性子の年間実効線量当量、 $H_{E,\gamma}$ は中性子誘導ガンマ線、及び天然放射性元素由来のガンマ線の年間実効線量当量である。それぞれの計算手法、計算条件は2章に記した。

太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地それぞれの年間実効線量当量を表 3.2 に示す。太陽活動による線量差は海で約 2.6 倍、高地でも 2.5 倍であった。周辺線量当量同様、地域差は小さく 1% 以下となった。

表 3.2 に示すように年間実効線量当量のワーストケースは太陽活動極小期の海領域における線量でその値は年間約 370 mSv/yr であった。海における実効線量当量の内訳を 25 歳女性宇宙飛行士の実効線量当量制限 [1] とともに図 3.2 に示す。実効線量当量で比較した場合、銀河宇宙線年間線量のみの見積もりでは、ワーストケースの太陽活動極小期であっても制限値を越えることはない。しかし、図 3.2 には大規模太陽フレアに起因する線量は含まれていない。大規模太陽フレアは一度に大量の線量を与える可能性があるため、長期に渡って定義された線量制限値と直接比較することは好ましくない。

表 3.2: 太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地の年間実効線量当量。

| | Effective Dose Equivalent [mSv/yr] | | | |
|------------|------------------------------------|----------|---------------|----------|
| | Solar Minimum | | Solar Maximum | |
| | Mare | Highland | Mare | Highland |
| GCRs | 326.1 | | 130.3 | |
| Neutrons | 38.8 | 35.8 | 12.1 | 11.7 |
| Gamma Rays | 4.2 | 4.2 | 2.1 | 2.2 |
| total | 369.0 | 366.1 | 144.4 | 144.2 |

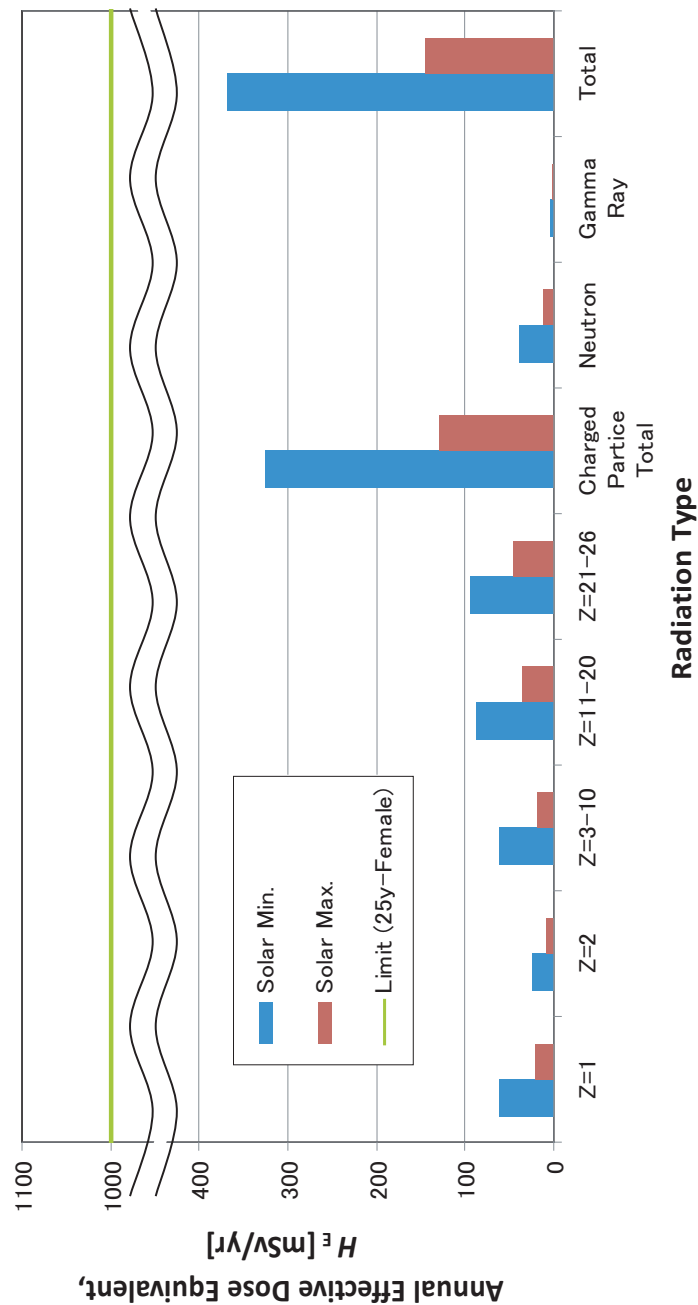


図 3.2: 海における実効線量当量の内訳と線量制限 (25 歳女性宇宙飛行士) [1]。

3.1.3 実効線量

月面の年間実効線量 E を式 3.3 のように定義する。

$$E = E_{\text{GCR}} + E_{\text{N}}. \quad (3.3)$$

ここで E_{GCR} は銀河宇宙線荷電粒子成分の年間実効線量、 E_{N} は二次中性子の年間実効線量である。換算係数が発表されていないため中性子誘導ガンマ線、及び天然放射性元素由来のガンマ線の年間実効線量は本章では省く。それぞれの計算手法、計算条件は2章に記した。

太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地それぞれの年間実効線量を表 3.3 に示す。太陽活動による線量差は海、高地共に 2.7 倍となった。地域差は 0.5% 以下であった。

表 3.3 に示すように年間実効線量のワーストケースは太陽活動極小期の海領域における線量でその値は年間約 890 mSv/yr であった。海における実効線量の内訳を 25 歳女性宇宙飛行士の実効線量制限 [2] とともに図 3.3 に示す。実効線量制限は厳しく設定されており、25 歳女性の制限値を一年間の月滞在で超えてしまう結果となった。

表 3.3: 太陽活動極小期モデルと太陽活動極大期モデルにおける月面の海と高地の年間実効線量。

| | Effective Dose [mSv/yr] | | | |
|----------|-------------------------|----------|---------------|----------|
| | Solar Minimum | | Solar Maximum | |
| | Mare | Highland | Mare | Highland |
| GCRs | 831.8 | | 308.6 | |
| Neutrons | 57.1 | 52.7 | 17.7 | 17.1 |
| total | 888.9 | 884.5 | 326.3 | 325.7 |

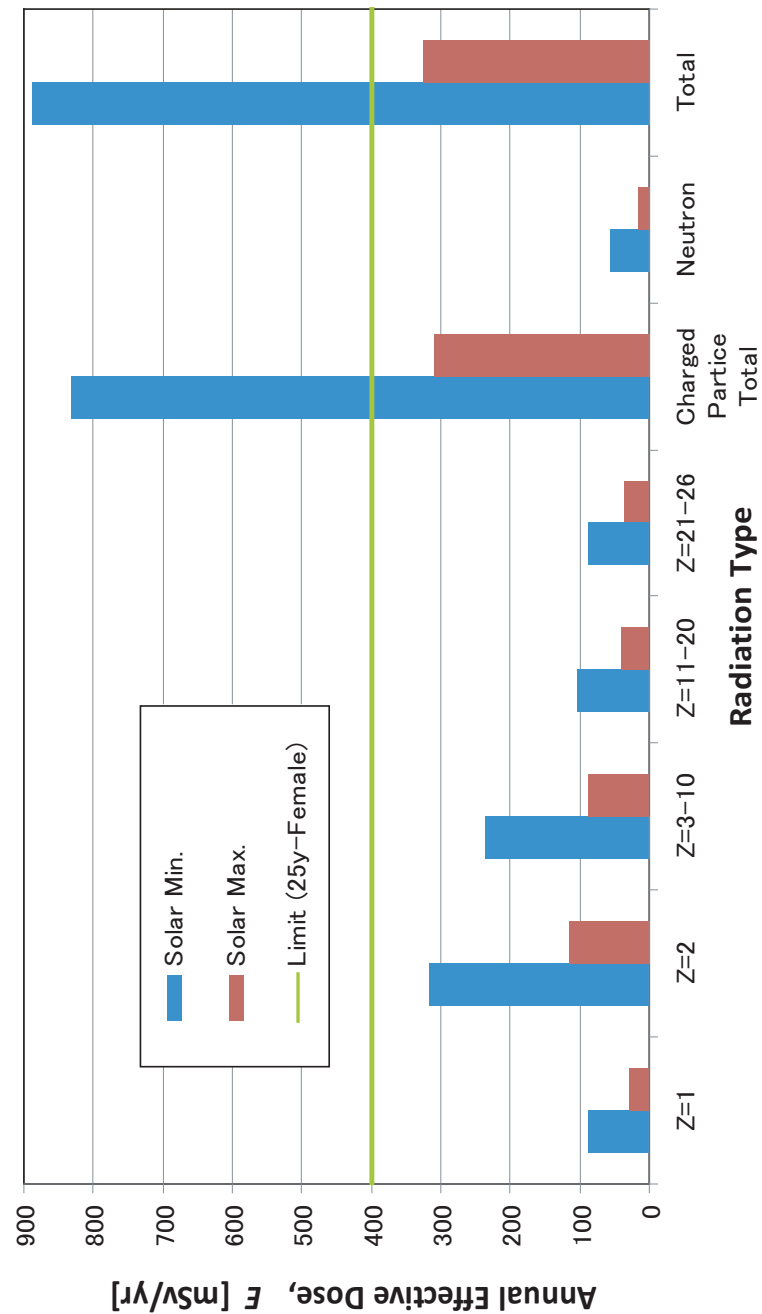


図 3.3: 海における実効線量の内訳と線量制限 (25 歳女性宇宙飛行士) [2]。

また、表 1.3 で示した地球上での平均被曝実効線量と比較すると、月の環境が非常に過酷であることがうかがえる。表 1.3 によれば、地球上での平均実効線量は年間 2.4 mSv 程度であった。とくに外部被曝について見ると、宇宙線由来の被曝が 0.39 mSv/yr であり、カリウムやトリウム、ウランなどの自然放射性由来の被曝は 0.48 mSv/yr と報告されている。地上における外部被曝の実効線量値をこれら二つの合算として 0.87 mSv/yr と考えると、月の銀河宇宙線荷電粒子及び二次中性子による年間実効線量はワーストケースでその 1000 倍以上である。つまり、たった 1 年間の月滞在で地球の 1000 年分以上の外部被曝を受けることになる。

3.2 太陽粒子線に起因する月表面線量

太陽粒子線は突発的な太陽の爆発現象である太陽フレアによって生じるため、常に月面の放射線環境に寄与するものではない。しかし、ひとたび大規模な太陽イベントが発生すれば、月や地球近傍の放射線環境は一変し、月面に滞在する居住者（業務従事者）に大きな線量を与える可能性がある。3.2 章ではこの突発的な太陽の大規模イベントの線量を取り扱う。太陽粒子線は太陽フレアの規模や継続時間、放出する粒子の組成などがイベントごとに様々であるために年間の見積もりを立てることはできない。3.2 章では 2 章で取り扱った特に大きな太陽イベントに対しての線量計算を行う。なお、3.2 章の計算では遮蔽は考慮しない。

3.2.1 周辺線量当量

本研究では 1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日の特に大規模な 6 イベントについて月面の周辺線量当量を計算した。計算結果を図 3.4 に示す。近年、太陽粒子線の重粒子成分のエネルギースペクトルも高精度に観測が行われている。特に 2003 年と 2005 年のイベントについて ACE、SAMPEX、GOES-11 等の高精度観測の結果が公開されている。本研究では太陽粒子線重粒子成分の周辺線量当量も計算した。2003 年 10 月 28 日のイベントについては陽子だけでなくヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の周辺線量当量を図 3.5 に示す。同様に 2005 年 1 月 20 日イベントについては陽子、ヘリウム核、酸素核、鉄核の周辺線量当量を計算し、図 3.6 に示す。

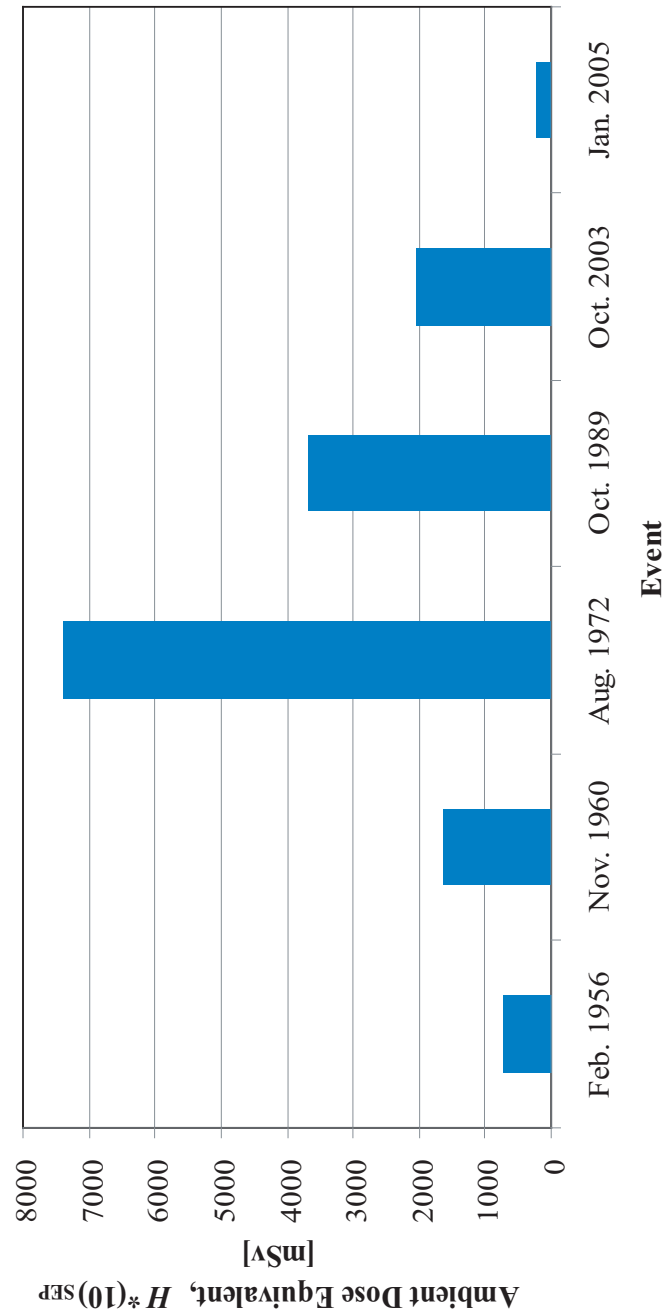


図 3.4: 太陽粒子線の周辺線量当量。

1 Sv を超える線量が見積もられる場合、白血球の減少や悪心など急性被曝の症状が現れる場合がある [3]。対象となるのは 1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、の 4 つのイベントである。また一般に 7000 mSv を超える線量を一度に浴びると 100% の人が死亡する [3]。本計算では 1972 年 8 月 4 日のイベントで最も大きな周辺線量当量が見積もられ、その線量値は遮蔽を全く考慮しなかった場合、7300 mSv を超えた。また、太陽粒子線重粒子成分の線量は図 3.5、図 3.6 から見てとれるように大きな寄与を与えない。

3.2.2 実効線量当量

周辺線量当量だけでなく、本研究では 1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日の特に大規模な 6 イベントについて月面の実効線量当量を計算した。計算結果を図 3.7 に示す。太陽粒子線重粒子成分の実効線量当量も計算した。2003 年 10 月 28 日のイベントについては陽子だけでなくヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の実効線量当量を図 3.8 に示す。同様に 2005 年 1 月 20 日イベントについては陽子、ヘリウム核、酸素核、鉄核の実効線量当量を計算し、その結果を図 3.9 に示す。

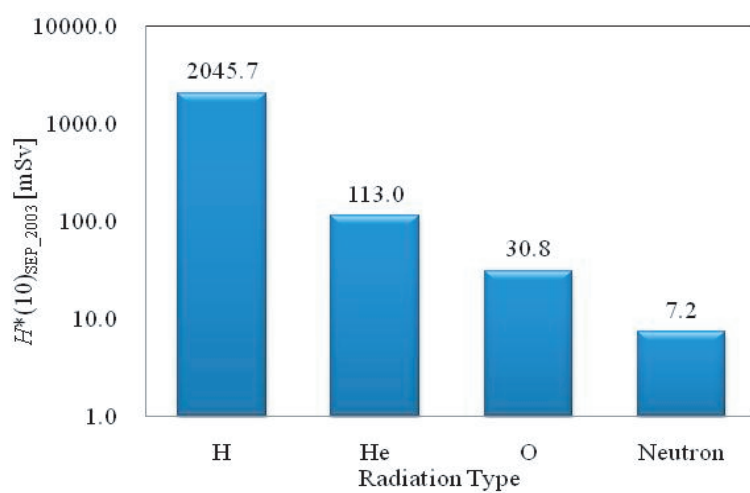


図 3.5: 2003 年 10 月 28 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の周辺線量当量。

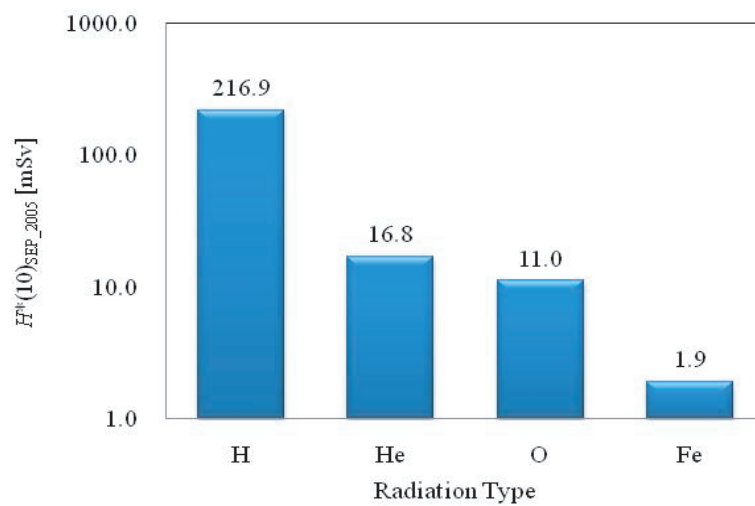


図 3.6: 2005 年 1 月 20 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び鉄核の周辺線量当量。

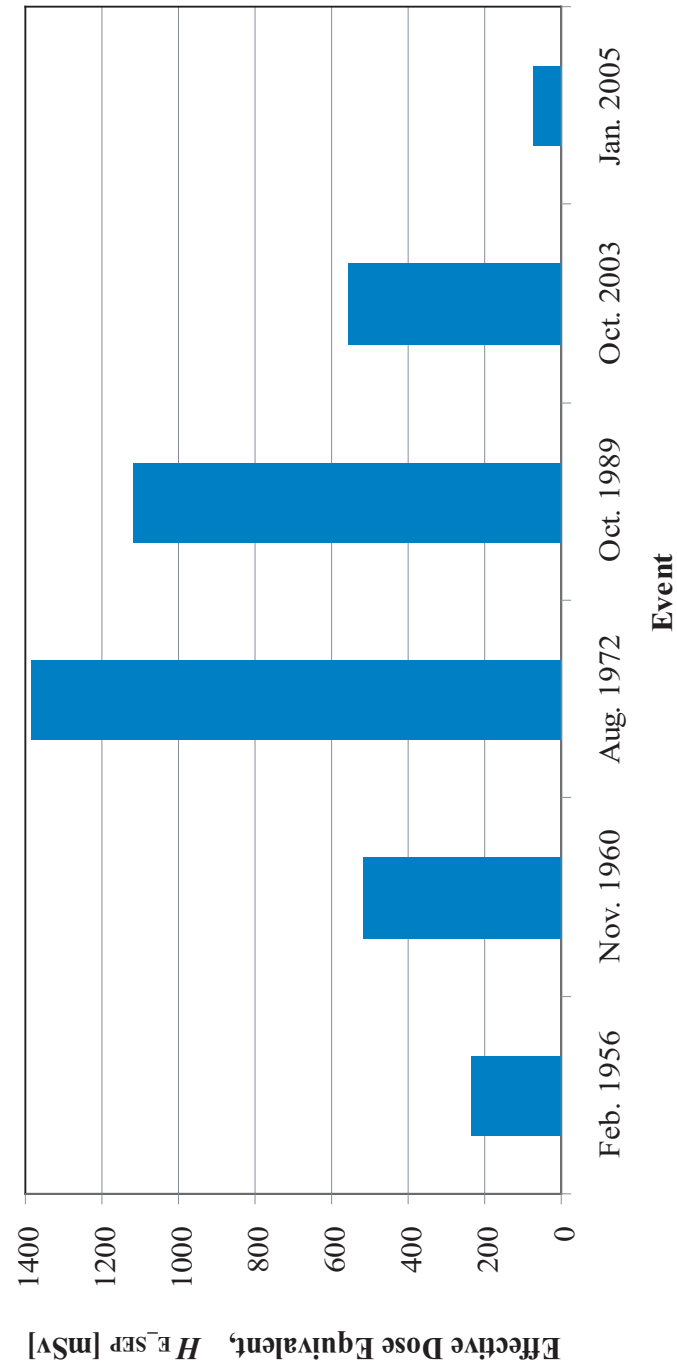


図 3.7: 太陽粒子線の実効線量当量。

実効線量当量でも 1 Sv を超える線量が見積もられるイベントがあった。対象となるのは 1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日の 2 つのイベントである。致死量に達するほどの値は計算されなかったが、1 Sv 以上の被曝は急性障害を引き起こす恐れがあるため、十分注意が必要である。実効線量当量においても太陽粒子線重粒子成分の影響は太陽粒子線陽子成分の寄与に比べ小さいことが分かった。低エネルギー領域に高い一次陽子フルエンスを持つ太陽粒子線の場合、それにより生成される月面二次中性子の線量についても十分小さいことが示された。

3.2.3 実効線量

実効線量当量と同様に 1956 年 2 月 23 日、1960 年 11 月 12 日、1972 年 8 月 4 日、1989 年 10 月 19 日、2003 年 10 月 28 日、2005 年 1 月 20 日の特に大規模な 6 イベントについて月面の実効線量を計算した。計算結果を図 3.10 に示す。太陽粒子線重粒子成分の実効線量も計算した。2003 年 10 月 28 日のイベントについては陽子だけでなくヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の実効線量を図 3.11 に示す。同様に 2005 年 1 月 20 日イベントについては陽子、ヘリウム核、酸素核、鉄核の実効線量を計算し、図 3.12 に示す。

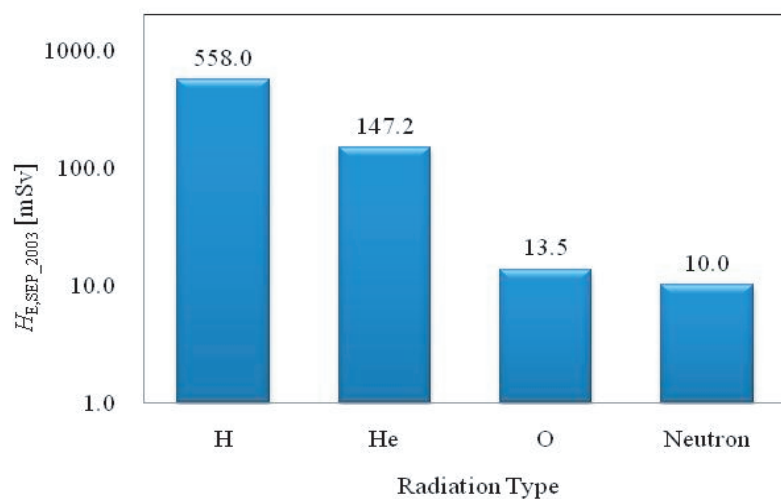


図 3.8: 2003 年 10 月 28 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の実効線量当量。

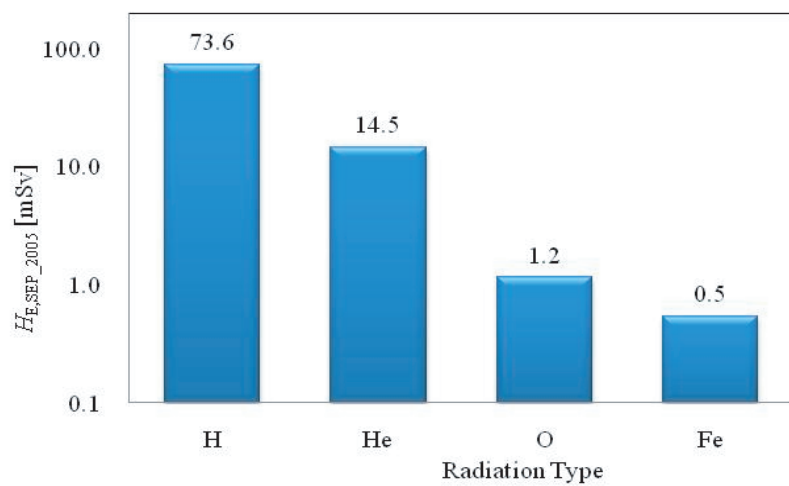


図 3.9: 2005 年 1 月 20 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び鉄核の実効線量当量。

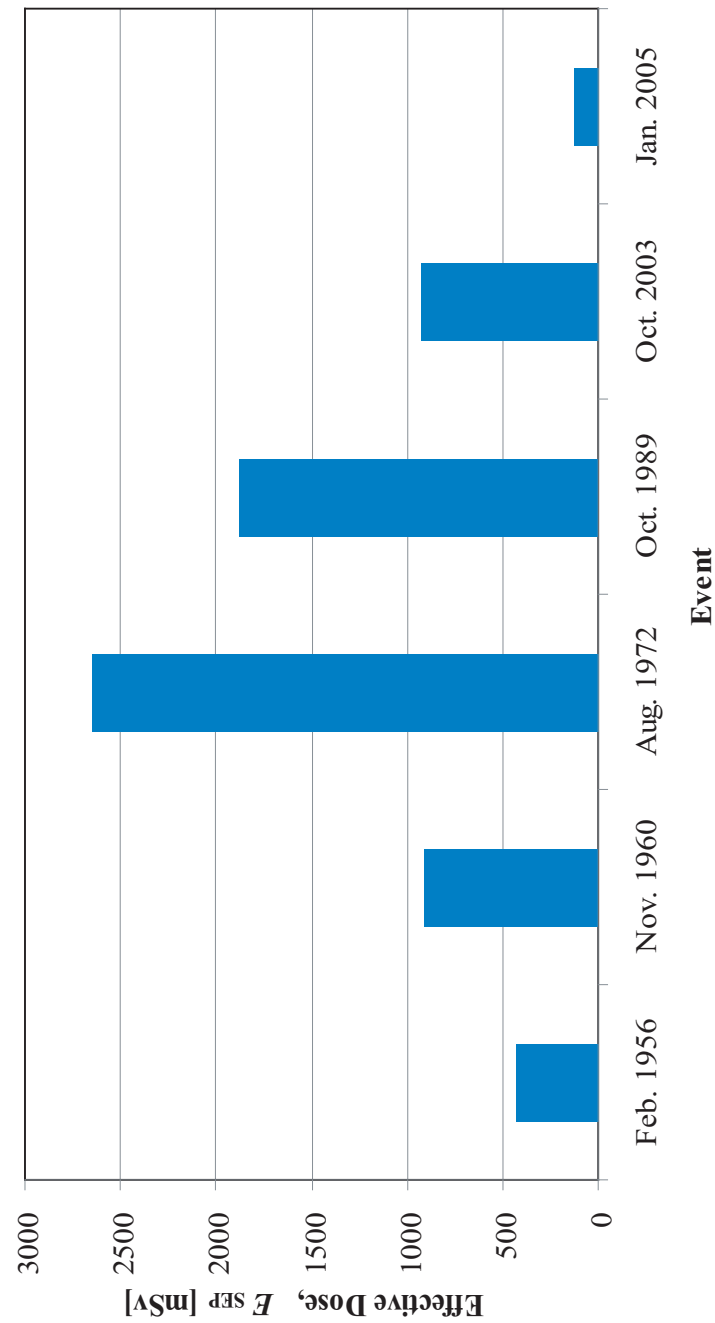


図 3.10: 太陽粒子線の実効線量。

実効線量計算では致死量に達するほどの太陽粒子線線量は得られなかった。しかし、1 Sv を超える急性被曝をもたらすような線量が見積もられるイベントはあった。対象となるのは1972年8月4日、1989年10月19日の2つのイベントである。これらに対しては十分な遮蔽が必要である。実効線量の場合、他の線量に比べてヘリウム核成分の線量が大きく出る傾向が銀河宇宙線に対しても現れている。これはヘリウム核に対する換算係数の大きさが現れている。酸素核や鉄核、二次中性子については、太陽粒子線の実効線量は大変小さい。

3.3 太陽粒子線に対するアルミの遮蔽効果

前述の結果から、大規模な太陽イベントにより放出される太陽粒子線は銀河宇宙線の年間線量をはるかに上回る被曝をもたらす可能性があることが示された。また時に発生する大規模イベントでは、たった一回のイベントで致死量に達するほどの大きな被曝をもたらすことが分かり、太陽粒子線から月居住者を守るために、遮蔽による放射線防護が必要となることが分かった。

3.3章では一般に宇宙服や宇宙船の材料として多様に使われているアルミニウム素材を遮蔽材として検討し、モンテカルロ計算によりアルミニウムの遮蔽効果を計算した。3.2章で最も大きな値を示した周辺線量当量の定義で計算を行った。使用したコードはIBM社のJ. F. Ziegler氏開発のモンテカルロコードSRIM 2008 [4]で、対象としたイベントは重粒子成分まで詳細観測が行われている2003年10月28日、2005年1月20日である。また、太陽粒子線との比較のために銀河宇宙線太陽活動極小期の陽子線量も算出した。本研究ではこれらのイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核を照射粒子とし、ターゲットをアルミニウムと組織等価物質の2層で形成した。アルミニウムの層を0 g/cm² から10 g/cm² まで変化させ、その後ろにある組織等価物質の入射方向1 cmでの線量を求めた。これは周辺線量当量の定義に基づく計算手法である。

アルミニウム遮蔽層の厚さを変えた時の2003年、2005年イベントの陽子、ヘリウム核、酸素核の周辺線量当量をそれぞれ図3.13、図3.13に示す。またアルミニウム遮蔽層の厚さに対する銀河宇宙線陽子の周辺線量当量の変化を図3.15に示す。

太陽粒子線は図2.5、図2.6に示されるように高エネルギー成分のフルエンスが低く、代わりに10 MeV程度の低エネルギー成分のフルエンスが顕著に高いという性質を持つ。特に2003年の太陽フレアはこの傾向が大きく、10 MeVでの陽子フルエンスが10⁹ cm⁻²MeV⁻¹にもなるのに対して、1000 MeVでの陽子フルエンスは7桁も少ない10² cm⁻²MeV⁻¹程度である。高エネルギーの成分が少ないためにその遮蔽は容易であり、10 g/cm²のアルミニウム厚があればその線量値はほぼ0 mSvとなることが図3.13から分かった。実際、宇宙船の鋼体は10 g/cm²程

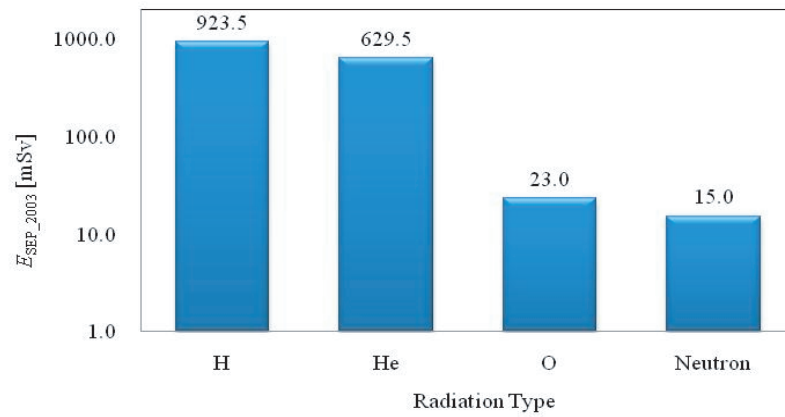


図 3.11: 2003 年 10 月 28 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び Geant4 シミュレーションにより得られた、太陽粒子線陽子成分由来の二次中性子の実効線量。

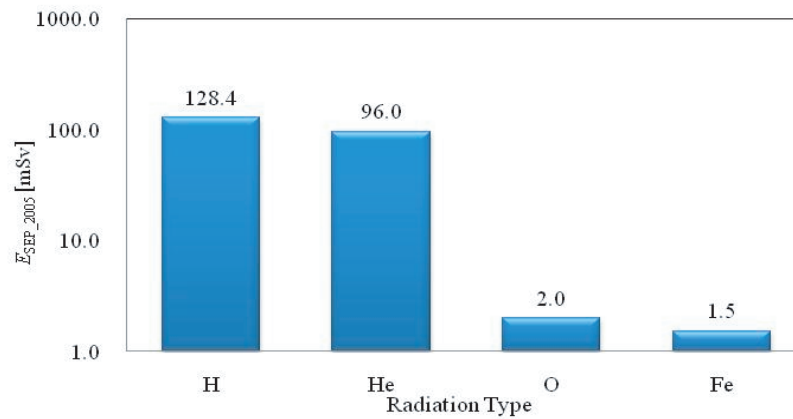


図 3.12: 2005 年 1 月 20 日のイベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、及び鉄核の実効線量。

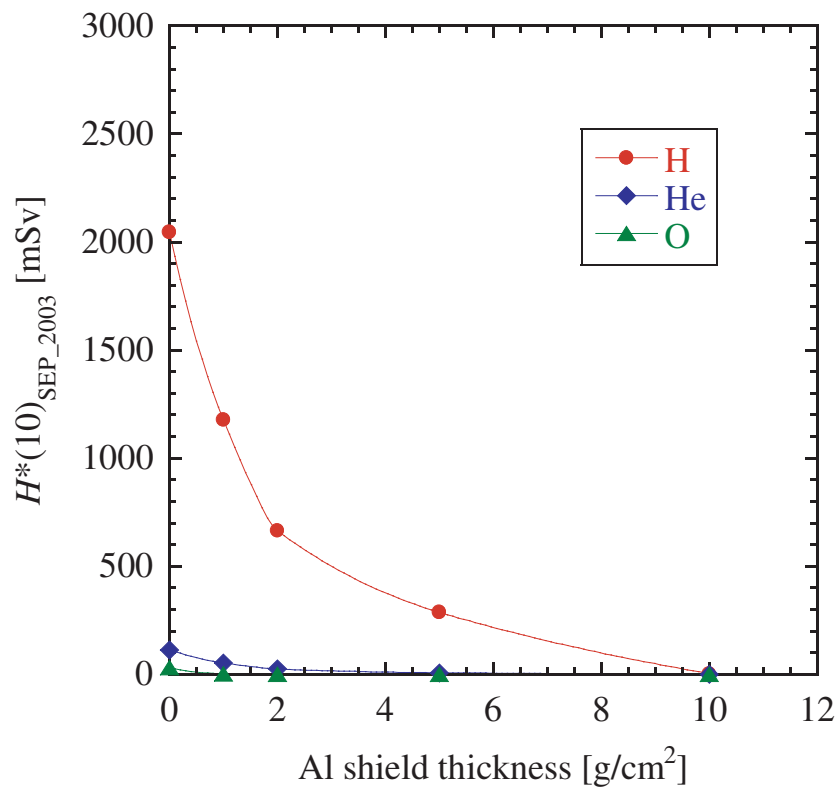


図 3.13: アルミニウムの厚さに対する 2003 年イベントの太陽粒子線陽子、ヘリウム核、酸素核の周辺線量当量の変化。

度の厚みで作られることが一般的であり、このようなエネルギースペクトルを持つ大規模イベントの際は、宇宙船の影に身をひそめるだけでも十分に遮蔽効果が期待できる結果となった。重粒子成分に関してはヘリウム核でアルミニウム厚 5.0 g/cm²、酸素核では 1.0 g/cm² で十分な遮蔽効果が期待できることが分かった。

2003 年のイベントとは異なり、2005 年の太陽フレアは比較的高エネルギー成分まで高いフルエンスを保つ。図 2.6 から分かるように、2005 年イベントは 1000 MeV 程度のエネルギー領域でも $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{MeV}^{-1}$ ほどのフルエンスを持つ。この場合、遮蔽は若干難しくなることが図 3.14 から見てとれる。2003 年イベントでは 10 g/cm² のアルミニウム厚でほぼ 0 mSv という十分な遮蔽効果を示していたが、2005 年イベントの場合、10 g/cm² のアルミニウム厚でも約 10 mSv の周辺線量当量被曝が見積もられる。しかし、その線量は遮蔽なしの場合の 20 分の 1 にまで下がる。また、総じて陽子成分より何桁もフルエンスの低い太陽粒子線重粒子成分の周辺線量当量は 10 g/cm² のアルミニウム厚で十分 0 mSv に近づくことが分かった。これらの結果から太陽粒子線に対しては 10 g/cm² のアルミニウムシー

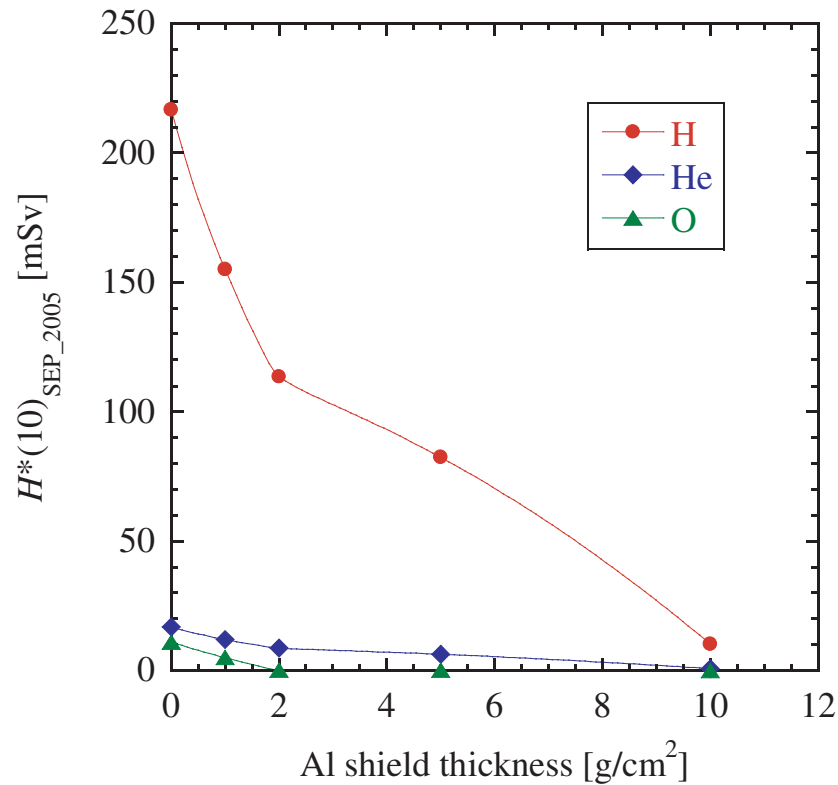


図 3.14: アルミニウムの厚さに対する 2005 年イベントの太陽粒子線陽子、ヘリウム核、酸素核の周辺線量当量の変化。

ルドが大変有効であることが示された。

しかし、銀河宇宙線の場合状況は異なる。本計算では銀河宇宙線陽子成分は 10 g/cm^2 のアルミニウムシールドでその 20% 程度しか遮蔽できないことが分かった。これは Angelis らの算出した太陽活動極小期の BFO 線量におけるアルミニウムシールドの遮蔽計算結果 [6] とよく一致する。Angelis らの研究によれば、さらにポリエステルや液体水素を遮蔽材とした銀河宇宙線の遮蔽を考慮しているが、ポリエステル 10 g/cm^2 で約 30%、液体水素 10 g/cm^2 で約 60% の遮蔽効果が見込まれている。やはり薄い 10 g/cm^2 程度の薄い遮蔽材では、銀河宇宙線の線量を十分下げることはいできない。

これは銀河宇宙線が太陽粒子線に比べ、高いエネルギー領域にまでなだらかにその存在度を維持していることが原因である。高エネルギー成分を多く持つ宇宙線は薄いシールドを容易に通り抜けてしまう。このような種類の宇宙線を十分に遮蔽するには月基地を建設し、大規模な厚みのシールドをもって遮蔽するほかない。3.4 章では月基地建設を視野に入れた、月地下の放射線環境計算について記述

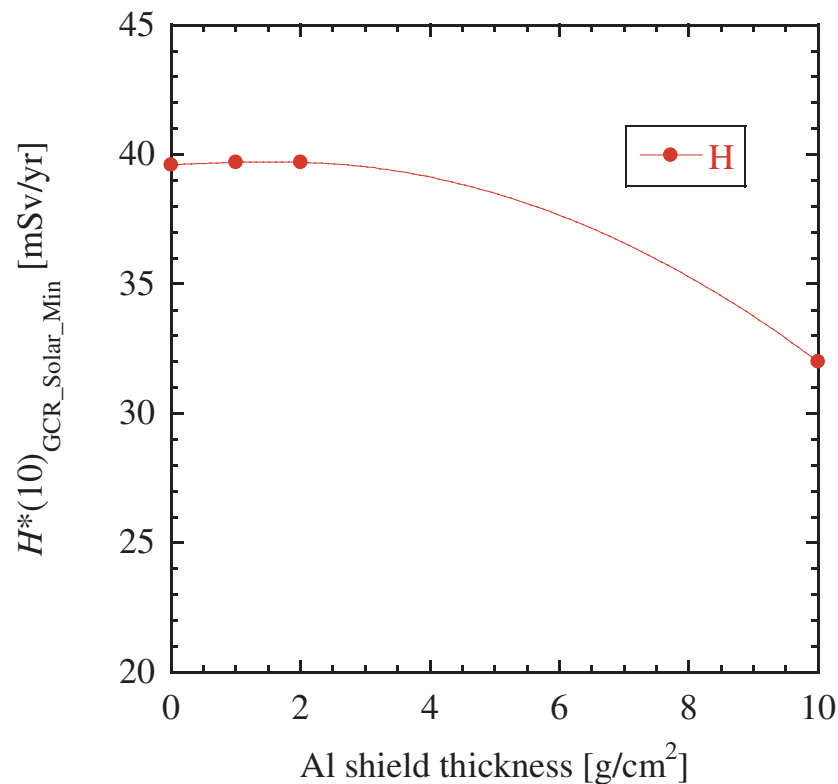


図 3.15: アルミニウムの厚さに対する太陽活動極小期の銀河宇宙線陽子の年間周辺線量当量の変化。

する。

3.4 銀河宇宙線に対する月レゴリスの遮蔽効果

3.3章で取り扱ったように、銀河宇宙線のような高エネルギー成分を多く持つ宇宙線は簡易的なアルミニウムシールドでは十分に遮蔽が行えない。とくに銀河宇宙線荷電粒子は恒常的に月面に降り注ぎ、月表面の放射線環境の支配的な粒子成分と言える。これらを効果的に遮蔽し、長期滞在の宇宙飛行士の被曝線量を格段に減らすためには、月基地を建設し大規模な遮蔽環境をそなえる必要がある。特に月基地は放射線シェルターとしてだけでなく月滞在者の住居環境にもなるため、その存在はたいへん重要である。しかし、地球から大量の物資を運んで基地を建設することは多くの困難を伴う。そこで、特に月有人探査の初期には、溶岩チューブなど月の特徴的な地形を主に使った基地の設置が理想的である。溶岩チューブ

は月地下に広がる火山性の洞窟であり、現在はまだその存在が確かめられてはいない。しかし、2007年打ち上げの日本の大型月探査衛星「かぐや」による遠隔探査の結果、その存在可能性が示唆されている [5]。溶岩チューブのような月の地下環境を利用した基地であれば、温度の大きな変化も緩和されるだけでなく、隕石衝突や銀河宇宙線のような恒常的な放射線から身を守ることは可能である。

そこで3.4章では将来の月基地建設を視野に入れて月物質を使った放射線の遮蔽効果を計算する。月レゴリス層をターゲットとしたモンテカルロ計算を行うことで月地下における放射線量を計算し、月基地建設にふさわしい深さの見積もりを行う。

本章では実効線量当量の定義に基づいた計算結果を示す。モンテカルロコードはGeant4 [7]を用いた。Geant4のversionは、Geant4.9.0である。電磁相互作用のモデルはStandardモデルを、ハドロン相互作用には理論ベースのモデリングを行うクオーク・グルーオンモデルに精度の高い核内カスケードモデルのBertiniカスケードを採用したQGSP_BERT_HPを使用した。さらに、このモデルは中性子の相互作用に、低エネルギー領域で高精度評価済み断面積を使用している。断面積ライブラリのversionは改良されたG4NDL3.11である [8]。

シミュレーション条件は以下の通りである。まずGeant4を用いて月物質を模した $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$ の立方体の標的を用意し、ここに10 MeV から100 GeVまでの銀河宇宙線陽子を照射した。使用したエネルギースペクトルは図2.1のBESSによる気球観測 [9]をもとにした太陽活動極小期モデルスペクトルである。月物質は表2.2に示されているアポロ11号着陸地点のソイル平均組成 [10]を用いてモデル化した。

太陽活動極小期、海領域モデルにおける銀河宇宙線陽子成分と二次中性子、ガンマ線の月地下の実効線量当量計算結果を図3.16に示す。本計算により月の地下の放射線環境が月表面とは全く異なるものであることが分かった。月表面では支配的であった銀河宇宙線荷電粒子成分の影響は、地下においては小さく、むしろ荷電粒子と月物質との相互作用により生成される二次中性子の線量が支配的となることが図3.16から分かる。図2.13の中性子フラックスのシミュレーション結果において、人体に対して特に大きな影響を与える速中性子成分は月地下の 80 g/cm^2 付近でピークを迎える。これは陽子の平均自由行程に依存しており、 80 g/cm^2 の深さにおいて中性子生成が最も活発に行われていることを意味している。このことから分かるように、月物質 80 g/cm^2 の深さにおいて中性子の実効線量当量はたいへん大きくなり、その値は月表面中性子線量の3倍以上に跳ね上がる結果となった。さらに深いところにガンマ線の線量ピークがある。約 100 g/cm^2 の深さにあるガンマ線線量ピークは、この深さで捕獲反応が活発に行われていることを示す。実際、図2.14に示したガンマ線フラックスの深さ分布でも、 100 g/cm^2 の

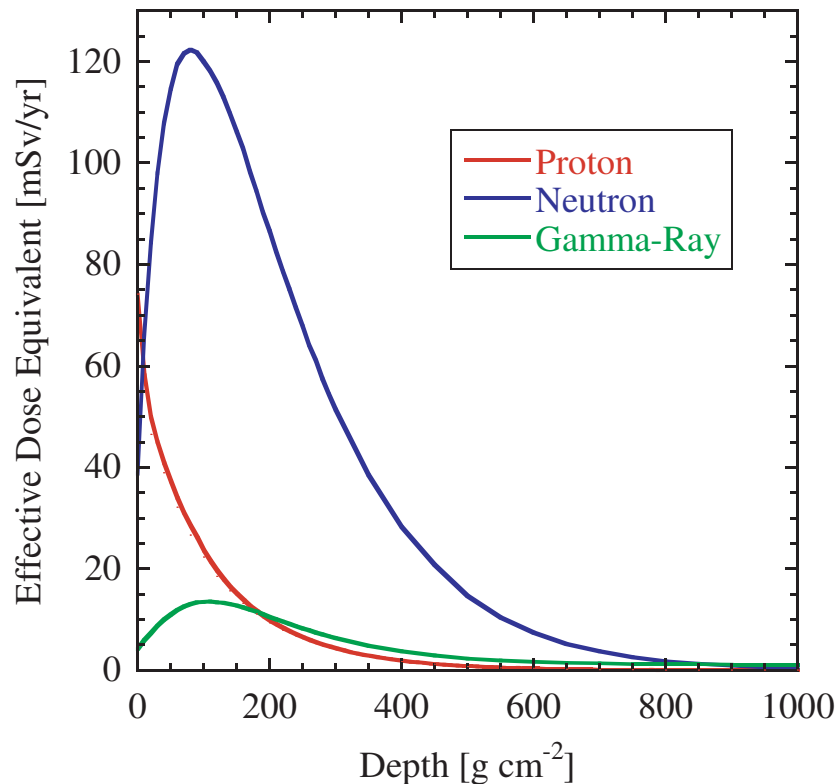


図 3.16: 太陽活動極小期、海領域モデルにおける銀河宇宙線陽子成分と二次中性子、ガンマ線の月地下の実効線量当量計算結果。

深さにピークを持つ計算結果が得られている。

本計算の結果、月物質を約 500 g/cm^2 使って月地下にシェルターを造ることができれば、二次中性子成分を含めて十分に遮蔽が可能であることが示された。月表層物質のレゴリス密度にもよるが、月表層の密度を 3.11 g/cm^3 [8] と仮定した場合、月地下 1.6 m 程度の深さが必要である。放射線業務従事者の線量制限である年間 50 mSv をクリアするためには、中性子線量だけでも約 300 g/cm^2 以上の月物質が必要となる計算となる。しかし中性子の線量を効果的に遮蔽する水やポリエステルの遮蔽材を組み合わせることで、浅い場所でも大幅な遮蔽効果が期待できる。

参考文献

- [1] National Council on Radiation Protection and Measurements (1989) *Guidance on Radiation Received in Space Activities*, NCRP Report No. 98, Bethesda, Maryland.
- [2] National Council on Radiation Protection and Measurements (2000) *Radiation Protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit*, NCRP Report No. 132, Bethesda, Maryland.
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000) *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Pubns, New York.
- [4] Ziegler, J. F., Biersack, J. P., Littmark, U. (1985) *The stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, New York.
- [5] Haruyama, J., Hioki, K., Shirao, M., Morota, T., Hiesinger, H., van der Bogert, C. H., Miyamoto, H., Iwasaki, A., Yokota, Y., Ohtake, M., Matsunaga, T., Hara, S., Nakanotani, S., Pieters, C. M., 2009, Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L21206.
- [6] De Angelis, G., Badavi, F. F., Clem, J. M., Blattnig, S. R., Cloudsley, M. S., Nealy, J. E., Tripathi, R. K., Wilson, J. W., 2007, Modeling of the Lunar Radiation Environment, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, **166**, 169-183.
- [7] Agostinelli, S., Allison, J., et al., 2003, Geant4 - a simulation toolkit, *Nucl. Inst. Meth.*, **A506**, 250-303.
- [8] Yamashita, N., Hasebe, N., Miyachi, T., Kobayashi, M., Okudaira, O., Kobayashi, S., Ishizaki, T., Sakurai, K., Miyajima, M., Reedy, R. C., d'Uston, C., Maurice, S. and Gasnault, O., 2008, Complexities of Gamma-Ray Line Intensities from the Lunar Surface, *Earth Planets Space*, **60**, 313-319.

-
- [9] Shikaze, Y., Haino, S., Abe, K., Fuke, H., Hams, T., Kim, K. C., Makida, Y., Matsuda, S., Mitchell, J. W., Moiseev, A. A., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, S., Ormes, J. F., Sanuki, T., Sasaki, M., Seo, E. S., Streitmatter, R. E., Suzuki, J., Tanaka, K., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., Yoshimura, T., 2007, Measurements of 0.2-20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer, *Astroparticle Phys.*, **28**, 154-167.
- [10] Lucey, P., Korotev, R. L., Gillis, J. J., Taylor, L. A., Lawrence, D., Campbell, B. A., Elphic, R., Feldman, B., Hood, L. L., Hunten, D., Mendillo, M., Noble, S., Papike, J. J., Reedy, R. C., Lawson, S., Prettyman, T., Gasnault, O., Maurice, S., 2006, Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **60**, 83-219.

第4章 月の放射線環境の考察

従来、宇宙空間での線量評価は圧倒的に存在度の高い宇宙線陽子成分の線量値の見積もりが主であった。それに対して本研究では銀河宇宙線陽子、太陽粒子線陽子成分のほかにそれぞれの重粒子成分や二次粒子の線量評価も行ってきた。本章では、本研究で明らかになった全体の線量評価に加え、

- 中性子成分の線量寄与
- 宇宙線重粒子成分の線量寄与

に関して議論を行う。加えて、今まで単一の線量定義でのみ評価されてきた宇宙飛行士の線量を、周辺線量当量、実効線量当量、実効線量の3種の異なる定義により計算することで、線量定義ごとの値の比較と各定義のメリットとデメリットをまとめ、さらに今後の宇宙開発に向けた線量評価に対する問題提起を行う。

4.1 中性子成分の線量寄与に関するまとめ

これまでの宇宙環境における線量測定では宇宙線一次成分の中でも特に高い存在度を持つ陽子の人体に対する影響ばかりが取り上げられる傾向が顕著であった。宇宙空間のように多種多様の放射線が広いエネルギー範囲の中で飛び交う特殊な環境は地球上には存在せず、そのため、高い存在度を誇る陽子にばかり注目が集まってしまった背景があると考えられる。特に銀河宇宙線荷電粒子存在度の内訳をみると、全体に占める陽子の割合は80%以上にもなる [1]。しかし、本研究で明らかになった月の放射線環境はこれまでの荷電陽子成分中心の線量評価の盲点を突くものであった。4.1章では特に月環境における二次中性子の線量寄与を中心にさらに議論を深める。

中性子は第2章でまとめたように、月に降り注ぐ宇宙線と月表層物質との相互作用により発生する二次的な成分である。したがって、これまでの線量測定や月の線量評価では重要視されることが少なかった。本研究ではモンテカルロ計算を行うことで、月表面や月地下における二次中性子の粒子強度を計算するとともに、月の海と高地における中性子の放射線量を計算した。その結果は第3章にて計算結果の一覧として示されている。それぞれの線量定義により異なった計算結果が算出されているが、これは各線量定義で用いられるファントムや換算係数違いといった特徴が現れている結果である。各線量定義の特徴とメリット、デメリットについては4.3章で議論する。

実用量である周辺線量当量、防護量である実効線量当量、実効線量の各々の線量計算から、最も二次中性子の線量がシビアな環境が定まった。太陽活動極小期の海領域における線量である。周辺線量当量の場合、この条件下での年間中性子線量は表3.1から分かるように 94.9 mSv/yr であった。これは全体的な年間周辺線量当量値の12.2%を占める計算である。同様に太陽活動極小期・海領域での年間実効線量当量は表3.2に示されるように 38.8 mSv/yr であり、全体的な年間実効線量当量の10.4%を占める。実効線量の場合、全体に占める中性子の割合は他の2つほど大きくはない。太陽活動極小期・海領域での年間実効線量は表3.3に示されるように 57.1 mSv/yr であり、全体的な年間実効線量当量の6.4%を占める。2007年のICRP勧告により中性子に対する放射線荷重係数が改変された [2]。それを受けて改訂された中性子に対する実効線量換算係数 [3] を使用した影響が現れているものであると考えられる。ここには2007年のICRP勧告により中性子に対する放射線荷重係数はエネルギーの連続関数として取り扱われるようになったが [2]、荷電粒子放射線荷重係数はそのようには定義されていないという線量評価の現状がある。

線量定義による違いはあるが、全体を通して6.4%から最大で12.2%もの放射線線量寄与を与える表面二次中性子線量は決して無視できる成分ではない。さらに

3.4章で取り扱った月地下の放射線環境評価では、二次中性子の線量が重要であることが示された。月表面では銀河宇宙線一次成分である陽子実効線量当量（太陽活動極小期で 60.6 mSv/yr ）の0.6倍程度である中性子実効線量当量値が、月物質を 80 g/cm^2 通り抜けた地下では陽子実効線量当量の3倍以上にもなるのである。以上のことから、月の線量評価に際しては、二次中性子の寄与を考慮することがたいへん重要であることが示された。

中性子線量の場所による違いは月の海と高地の中性子線量の差から見積もられる。周辺線量当量の中性子線量は表3.1に示されている。太陽活動極小期で比較すると、海領域の中性子年間周辺線量当量は 94.9 mSv/yr であり、高地領域の中性子年間周辺線量当量は 86.3 mSv/yr であった。その差は9.5%である。実効線量当量の中性子線量は表3.2に示されている。太陽活動極小期で比較すると、海領域の中性子年間実効線量当量は 38.8 mSv/yr であり、高地領域の中性子年間実効線量当量は 35.8 mSv/yr であった。その差は7.8%である。実効線量の中性子線量は表3.3に示されている。太陽活動極小期で比較すると、海領域の中性子年間実効線量は 57.1 mSv/yr であり、高地領域の中性子年間実効線量は 52.7 mSv/yr であった。その差は8.0%である。このように線量定義によって7.8%から9.5%までの地域差が見られた。この地域差が生じる理由を以下にまとめる。

月の海は表2.2から分かるように鉄やチタンといった元素が豊富に存在する玄武岩質の組成が大半である。それに対して高地の組成はカルシウムやアルミニウムといった元素が豊富で斜長岩質である。表4.1にアルミニウム、カルシウム、チタン、鉄の熱中性子捕獲断面積と二次中性子収率を示す[4, 5]。なお、本研究では熱中性子のエネルギー領域を $E < 0.4 \text{ eV}$ 、速中性子のエネルギー領域を $E > 0.5 \text{ MeV}$ とした。表4.1から分かるように、鉄とチタンは高い二次中性子収率を持っている。また、熱中性子捕獲断面積もアルミやカルシウムに比べて高い。したがって、鉄やチタンを多く含む玄武岩質な組成をモデルとした海領域では、熱中性子の吸収率が増加し、熱中性子フラックスが減少するとともに、中性子発生率は増加し、速中性子フラックスは増加する。この結果が、図2.10にも表れている。

本研究の計算における月表面環境の高速中性子フラックスは全体中性子フラックスの38%程度であった。熱中性子はさらに低く、中性子フラックス全体の3%程度を構成している。月面中性子フラックスにおいて最も支配的なエネルギー領域は熱外中性子の領域であり、そのエネルギー範囲が広いこともあり、月面中性子全体の60%近くを占めている。しかし、年間実効線量の中性子のエネルギーによる内訳をみると高速中性子が線量に寄与する割合がたいへん大きいことが分かる。中性子全体の38%程度の強度しかない高速中性子だが、中性子実効線量の95%以上は高速中性子線量で占められているのである。これは高速中性子の線量換算係数が大きいことに起因する。中性子を線量に換算する場合、その換算係数は表2.4、

表 4.1: アルミニウム、カルシウム、チタン、鉄の熱中性子捕獲断面積と二次中性子収率 [4, 5]。

| | capture cross-section at thermal neutron | production cross- section at 3 GeV |
|----|---|---------------------------------------|
| | (mbarn) | proton (mbarn) |
| Al | 231 | 902 |
| Ca | 431 | 1398 |
| Ti | 6080 | 2279 |
| Fe | 2560 | 2522 |

図 2.16、図 2.17 から分かるように、高速中性子に対して大きな値を持つ。つまり、高速中性子がとくに人体に対して多くのエネルギーを付与するのである。したがって鉄やチタンを多く含む海領域で高速中性子の生成が増え、結果的に高地領域に比べて高い中性子線量となったことが分かる。

また、太陽活動極小期と太陽活動極大期の二次中性子線量の値の違いは場所による違いよりも大きく、海領域の線量で比較すると、表 3.1 に示した太陽活動極大期の周辺線量当量は 29.4 mSv/yr であるのに対して、太陽活動極小期は 94.9 mSv/yr と 3.2 倍も大きい値を示す。表 3.2 に示した実効線量当量も表 3.3 に示した実効線量もこの傾向は同じである。太陽活動極小期モデルでは中性子強度を計算する際に、入射する一次陽子のエネルギースペクトルを BESS の 1997 年の観測 [11] をもとにして、太陽活動モジュレーションパラメータの値を $\phi=491$ MV とした式をシミュレーション計算に採用した。このことにより、 $\phi=1300$ MV とした太陽活動極大期の陽子エネルギースペクトルに比べ、入射する一次陽子の低エネルギー側のフラックスが高くなった。主に陽子の場合、 10^4 MeV 以下のエネルギー領域でこのモジュレーションパラメータが効いてくる。これは図 2.1 から明らかなである。この違いが太陽活動極小期での中性子生成量を増やし、結果的に中性子線量を高めることにつながった。

太陽活動の変調に伴って降り注ぐ銀河宇宙線のフラックスが変わり、それに伴い地中から漏洩してくる二次粒子の線量も大きく変化するというのは、地球の放射線環境とは全く異なる月の放射線環境の大きな特徴の一つである。月の放射線環境を見積もる際は海や高地といった場所による線量値の違いはさほど大きくないが、太陽活動による放射線量の違いがたいへん重要になることが分かった。これは本研究で太陽変調パラメータを含めたより新しいエネルギースペクトル観測結果を使用したことによる成果である。

これは月だけではなく、その他の惑星探査や国際宇宙ステーションなどの線量評価においても応用されるべき結果である。火星は月に比べて若干の大気が存在するため、降り注ぐ宇宙線一次成分だけでなく、大気と宇宙線が相互作用して発生する二次粒子の線量評価も重要である。火星表土の元素組成の観測はフォボス (Phobos) 探査機による周回遠隔探査とヴァイキング (Viking) 1号2号およびマーズパスファインダー (Mars Pathfinder) の着陸機によるその場観測によるものがあるが、これらの観測値は互いに良い一致を示している [6]。その組成は SiO_2 量から見ると、玄武岩から超塩基性岩に近いが、地球の玄武岩や超塩基性岩に比べて鉄に富んでいるという特徴が報告されている [7]。そのため、火星表土での二次中性子の生成は月に比べさらに重要であるかもしれない。今後の宇宙および惑星有人探査に向けた課題の一つとして、宇宙線に起因する二次粒子の線量評価にもっと焦点を当てるべきであると考えらる。

4.2 宇宙線重粒子成分の線量寄与に関するまとめ

先に述べたように、これまでの宇宙空間における線量測定においては、宇宙線一次成分の陽子の線量評価が主だったものであった。銀河宇宙線全体の80%以上を構成する陽子 [1] はもちろんたいへん重要で、月環境においても支配的な成分であることは間違いない。しかし、陽子に比べその存在度が圧倒的に低い宇宙線重粒子成分の重要性も無視するわけにはいかないということが、本研究の計算結果から明らかになった。これは特にそれぞれの線量定義の中の換算係数にその値の大きさが起因してしまうため、十分に評価することは大変難しい成分である。さらに現状では、その存在度の低さから、ヘリウム核以外の宇宙線重粒子成分のエネルギースペクトルは、その太陽活動の変調を含め、高精度に観測されたデータがほとんどないという問題点もある。よって、重要であるにもかかわらず、十分な線量評価が行えないというジレンマがある。4.2章ではそれぞれの定義に基づく荷電粒子線量の計算結果から、特にその重粒子成分の線量寄与の重要性を示したい。

太陽活動極小期における銀河宇宙線荷電粒子成分の年間周辺線量当量、年間実効線量当量、年間実効線量の内訳をそれぞれ図4.1、図4.2、図4.3に示す。線量定義ごとにそれぞれの特徴が良く現れる結果となっている。一見して分かるように、周辺線量当量、実効線量当量、実効線量ともに、その合計値、割合は異なる。地上における被曝では実用量と防護量の良い一致が報告されているが、エネルギー範囲が広く多種多様な荷電粒子が飛び交う宇宙環境では、実用量が防護量のよい近似になることは認められない。

まず周辺線量当量の内訳をみると、図4.1から分かるように銀河宇宙線鉄核の

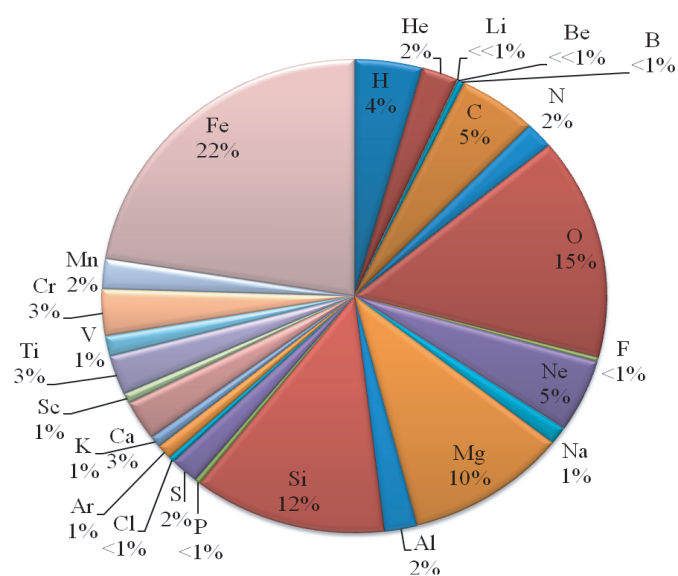


図 4.1: 太陽活動極小期における銀河宇宙線荷電粒子成分の年間周辺線量当量の内訳。

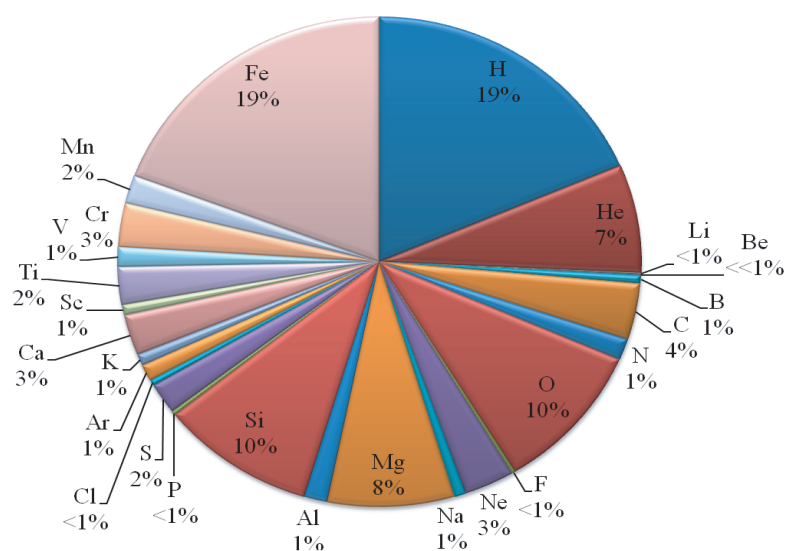


図 4.2: 太陽活動極小期における銀河宇宙線荷電粒子成分の年間実効線量当量の内訳。

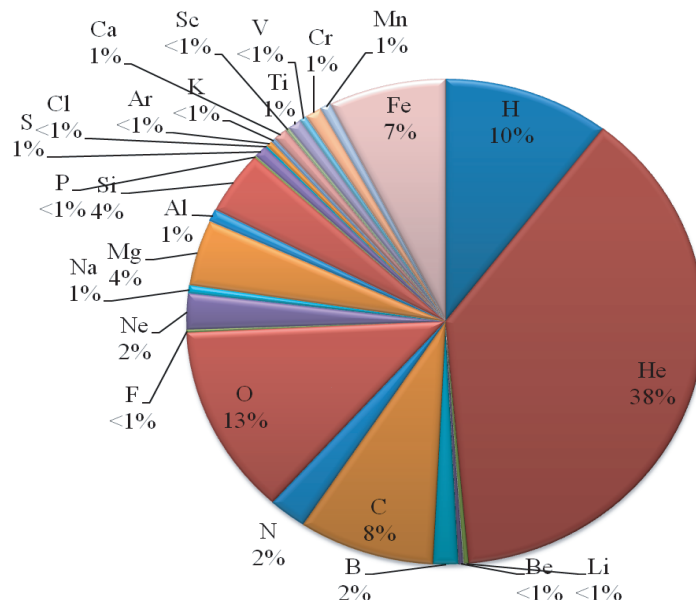


図 4.3: 太陽活動極小期における銀河宇宙線荷電粒子成分の年間実効線量の内訳。

成分が最も大きく、荷電粒子周辺線量当量全体の 22% を占めている。その他にも陽子線量より目立って大きい炭素、酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素といった荷電粒子の線量寄与が大きい。銀河宇宙線全体の 80% 以上を占める陽子成分が周辺線量当量に占める割合は 4% 足らずである。大きな線エネルギー付与を持つ重粒子成分の線質係数が陽子やヘリウム核といった線エネルギー付与の小さい成分に比べ大きく見積もられていることが示された。特に銀河宇宙線の鉄核成分は大きな平均線エネルギー付与を持ち、図 2.3 から分かるようにその相対存在度も比較的高いため、周辺線量当量では高い線量値を示している。太陽活動極小期の銀河宇宙線陽子と鉄核の対比を表 4.2 に示す。鉄核成分の強度は陽子成分の 0.00042 倍と大変小さい。しかし阻止能は原子番号の二乗に比例するため、吸収線量に換算すると鉄核成分と陽子成分の比は約 0.24 倍と比較的大きくなる。さらに平均線質係数が陽子の 24.3 倍にもなる鉄核成分は、陽子成分に対して 5.2 倍の周辺線量当量を算出する。鉄に比べて炭素、酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素等の平均線質係数は小さい。しかしその存在度の高さから線量値が大きく算出されている。

次いで、実効線量当量の内訳についてみる。図 4.2 に示されたように、銀河宇宙線陽子成分と同等の線量を鉄核が占めており、陽子と鉄核のみだけでも年間実効線量当量の 40% 近くを占める計算である。これも鉄核の存在度がほかに比べて比較的高いことに関係している。鉄核や陽子の実効線量当量には及ばないものの全体の 5% 以上を占めるヘリウム、酸素、マグネシウム、ケイ素といった重粒子成

表 4.2: 太陽活動極小期における銀河宇宙線陽子と鉄核の比較。

| | H | Fe | Fe/H |
|---|------|---------|---------|
| Flux [cm^2/s] | 2.1 | 0.00088 | 0.00042 |
| Square of atomic number | 1 | 676 | 676 |
| Absorbed dose [mGy/yr] | 29.5 | 7.1 | 0.24 |
| Average Quality factor [Sy/Gy] | 1 | 24.3 | 24.3 |
| Ambient Dose Equivalent [mSv/yr] | 29.5 | 152.3 | 5.2 |

分の寄与も無視できない値である。

実効線量の内訳は図 4.3 に示されている。この内訳は同じ防護量である実効線量当量の内訳と大きく異なっている点がいへん興味深い。全体に占める陽子の実効線量割合が 10%程度であるのに対して、ヘリウム核、酸素核の割合がそれぞれ 38%、13%と大きく上回っている。鉄核や炭素核の占める割合も陽子線量と同等に大きい。陽子線量の割合が実効線量当量に比べ小さくなったことは、2007 年の放射線荷重係数の改訂に伴う変化である。2007 年の ICRP 勧告において、中性子の荷重係数がエネルギースペクトルとなったことは前章で記したが、陽子の放射線荷重係数に関しても改訂がなされた。結果、今まで陽子に対する荷重係数が全てのエネルギー領域に対して 5 であったのに対し、2007 年以降は陽子の放射線荷重係数を 2 とすることが定められた。これにより、計算される陽子の線量が大きく減少した。また、全ての荷電重粒子成分に対して放射線荷重係数が一定に定まっているため、ヘリウム核に対しても鉄核に対してもその放射線荷重係数に違いはなく 20 という値に決められている。

それぞれの定義ごとの特徴はあるものの、周辺線量当量、実効線量当量、実効線量それぞれにおいて、陽子以外の重粒子成分が全体に占める割合がいへん大きいことが図 4.1、図 4.2、図 4.3 から示された。特に銀河宇宙線においては重粒子の成分は決して無視されるべきものではない。むしろ格段に存在度の高い陽子に比べて、線量的にはより高くなる可能性すら示唆される結果となった。本研究においては、宇宙線重粒子成分の磁気圏外のエネルギースペクトル形状を、ヘリウム核のエネルギースペクトル形状と同形として扱い、その存在度のみで規格化したため、計算値において若干の不確定成分を含む。銀河宇宙線荷電粒子成分の月表面環境における重要性が示されたことにより、今まさに求められることは、さらなる高精度な宇宙線観測データの提供であろう。地球磁気圏の外における銀河宇宙線重粒子成分のエネルギースペクトルを、太陽活動変調をふくめ高精度に観測することで、今後の線量評価はさらにその精度を高めることができるに違い

ない。

4.3 各線量定義のメリットとデメリット

本研究では実用量である周辺線量当量と防護量である実効線量当量、実効線量の3種の定義に基づき、月環境における放射線線量の計算を行った。1つの線量定義に限定しなかった理由は、現状においてどの線量を用いて将来の宇宙飛行士の放射線環境評価を行うべきか、未だに明確に定まっていないという背景があるからである。図4.4に銀河宇宙線に起因する年間線量の各定義に基づく計算結果を示す。図4.1、図4.2、図4.3、図4.4を総合してみると、それぞれの定義ごとに全く異なる総線量値が算出されていることが分かる。そしてその内訳も全く異なることが見て取れる。将来、ミッションの成立性を判断する基準を設けるためには、対象とする線量定義の統一が求められる。

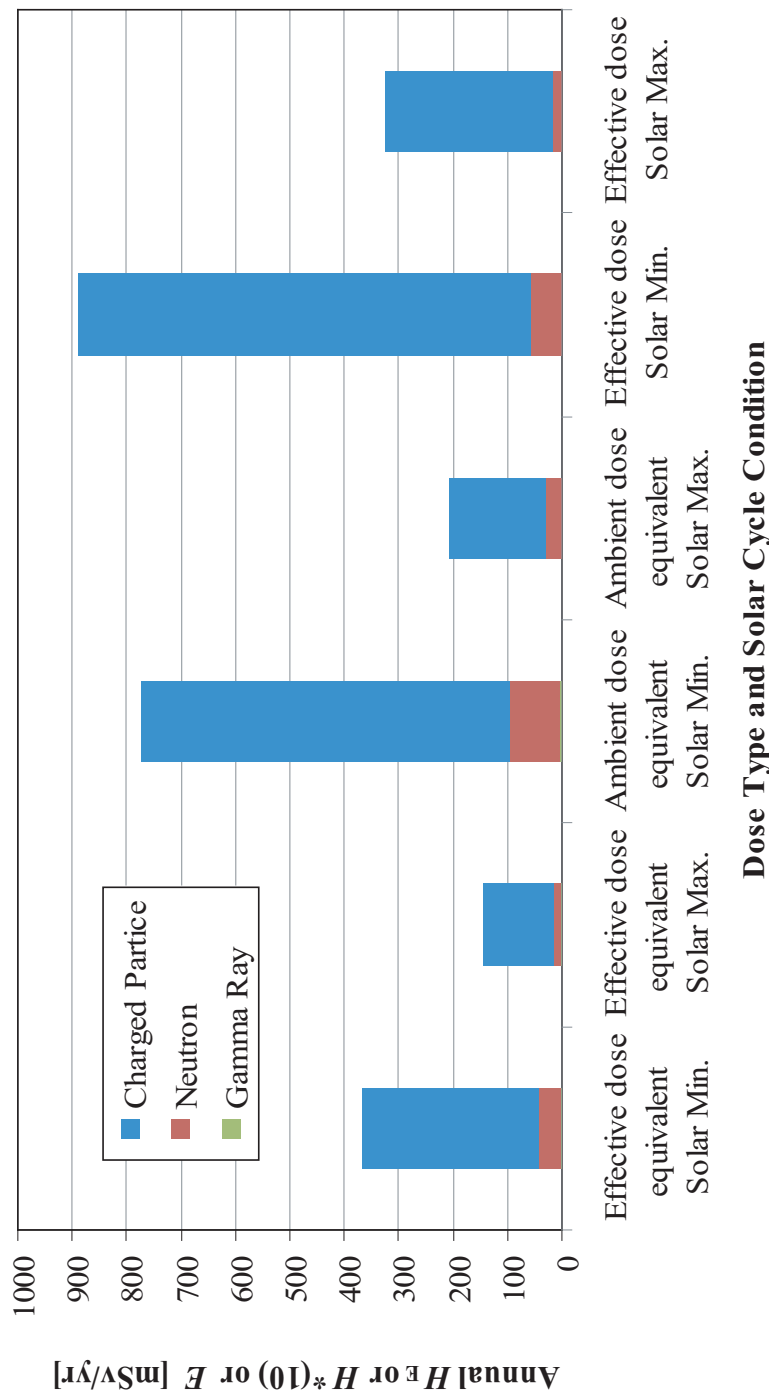


図 4.4: 太陽活動極小期および極大期における、銀河宇宙線に起因する年間実効線量当量、年間周辺線量当量、年間実効線量の比較。

実用量と防護量の明確な違いは第1章でも述べたが、実際に観測にかかる量が、身体各組織線量の加重平均を計算した値かという点にある。実際、実用量の一種である周辺線量当量はICRU球中のある一点の線量を計測するものであるため、実質的に計測可能である。実際に計測にかかるという点は周辺線量当量の大きなメリットの一つである。しかし、宇宙空間の線量評価においてはデメリットの要素も大きい。計算でしか得ることのできない防護量の実効線量当量と実効線量は実際計測される周辺線量当量に比べ、大きくなることが望ましい。しかし、図4.4から分かるように、同じ宇宙線モデルを使って計算された月表面の年間周辺線量当量は月表面の実効線量当量に比べ大きな値を算出している。特にICRU球の構造上、人体表面付近ですぐに止まってしまう荷電粒子の線量が過大評価されている傾向が見られる。荷電粒子のような低透過率の割合が大きい月表面環境において、高透過率に特化して定められている周辺線量当量は全体の線量を把握するための指標としては適さないことが分かる。地上のようにガンマ線や中性子といった透過率の高い放射線環境において、実用量は防護量のよい近似値となることが示されているが、宇宙空間、特に月表面環境においてこれは成り立たないことが示された。

次いで、防護量について考察する。最新の生物学的研究に基づいて最も新しい改訂が加えられている実効線量は、定義の古い実効線量当量より保守的に定められるべき値であるとされている[3]。実際、図4.4に示した計算結果では年間の実効線量は年間実効線量当量より大きな値で算出されている。したがって、保守的に定められるべきとされた要求を、月表面環境では満たしていることが分かる。また同時に、実用量である周辺線量当量よりも大きな値であるため、実測値よりも安全側に立った線量定義であることが見受けられる。したがって、ミッション要求を厳しく設定したい場合には実効線量はたいへん実用的である。

しかし、算出される値をただ大きくすればよいというわけではない。重要なことは、より実際の人体被曝に則した計算結果を示せることである。第1章で述べたように、実効線量の放射線荷重係数、臓器・組織荷重係数は近年大きく改訂が加えられた。中性子に対してエネルギー・スペクトルとしての荷重係数が採用されたことは大きな前進であった。しかし、地球環境では一般的でないような荷電粒子の被曝についての見積もりが大雑把であるというデメリットがある。この点が、月環境における実効線量の値を大きく算出させている要因であると考えられる。実際、2007年の改定では陽子に対して、今までは大きすぎる放射線荷重係数が与えられていたとして、従来の5という数字から、半分以下の2という値に置き換えられた。これにより、陽子実効線量の見積もり値は半分以上に変更されたのである。このような背景を見るに、現状における放射線荷重係数の定義は未だ未熟であると考えられる。より、詳細なデータ収集をもとに、更なる改良が必要な点として、

ここで一つ提言したいのは、荷電粒子の放射線荷重係数のエネルギースペクトル化である。宇宙を飛び交う放射線は大変広いエネルギー領域にわたって存在している。よって宇宙飛行士の放射線量評価は加速器のような単一ビームの放射線環境ではなく、このような広いエネルギー領域の放射線環境の下で取り扱われなければならないものである。よって一概に同じ値で放射線荷重係数を与えるのではなく、エネルギーの関数としての放射線荷重係数が望ましい。

また一方、ヘリウム核以上の重粒子成分の放射線荷重係数についてもより詳細なデータをもとに改良が加えられるべきであると考え。現在、ヘリウム核以上の重粒子成分の放射線荷重係数は一概に20という値が与えられおり、これは1990年のICRP勧告[8]より改訂されていない。しかし、銀河宇宙線ヘリウム核から鉄核までの重粒子成分を線量計算に取り扱った結果、図4.3に示されるように、ヘリウム核の年間実効線量が極端に大きくなるという結果が導かれた。同様に太陽粒子線の線量評価についても同じ傾向が見られる。2003年及び2005年の太陽イベントの際の各線量値をそれぞれ図4.5、図4.6に示す。ここでも太陽粒子線ヘリウム核実効線量の値の大きさが目立つ。図2.7、図2.8に示されているように陽子成分に比べてヘリウム核フルエンスの存在度の低さは顕著であるにも関わらず、その線量値は陽子線量に匹敵するほどの値を算出している。多種多様な放射線粒子が飛び交う宇宙環境において、このような大雑把な放射線荷重係数は極端に線量計算値を上昇させ、宇宙飛行士のミッション期間を縮小させる方向に向かわせる要因となりかねない。よって荷電重粒子成分に対する放射線荷重係数の見直しが望まれる。

実効線量当量は定義がより古く、近年の改訂は加えられていない。したがって基づく生物学的データが古いままであるというデメリットを持つ。しかし、実効線量と異なり、その線量定義は線量当量の計算に基づいている。第1章の式1.4で示したように、線質係数をベースにした線量定義である。これにより、各放射線粒子のエネルギーごとの重みづけが可能となっている。つまり実効線量のような大雑把な見積もりは実効線量当量計算からは排除されているというメリットがある。実効線量当量の定義に対してより新しい生物学的データを加えた線量計算が現状で最も高精度に宇宙及び惑星の放射線環境評価を行える指標になるのではないかと期待している。Sato et al. ではこのような条件を満たす換算係数を公開しており、線エネルギー付与ベースの $Q(L)$ だけでなく、さらにデルタ線の寄与も考慮した $Q(y)$ 線量換算係数が発表されている[3, 9]。陽子、中性子、ヘリウム核、そして炭素・酸素、ケイ素・鉄核の線量換算係数をそれぞれ図4.7、図4.8、図4.9、図4.10に示す。これらの換算係数により得られる線量はICRP等で正式に認められたものではないが、最新の組織・臓器荷重係数を用いて、かつ線質係数を基として計算されるものであるため、より最新の実効線量当量として取り扱われ

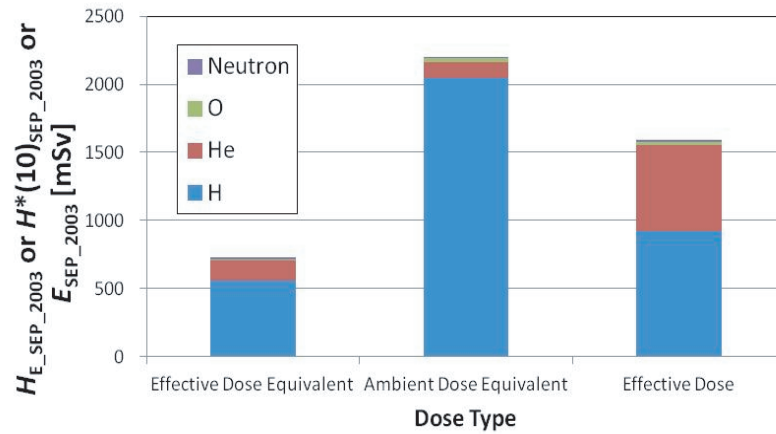


図 4.5: 2003 年太陽イベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、陽子に起因する二次中性子の実効線量当量、周辺線量当量、実効線量。

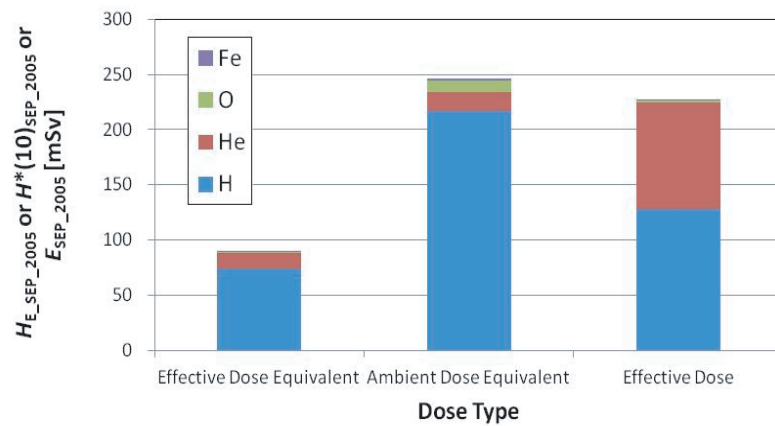


図 4.6: 2005 年太陽イベントの陽子、ヘリウム核、酸素核、鉄核の実効線量当量、周辺線量当量、実効線量。

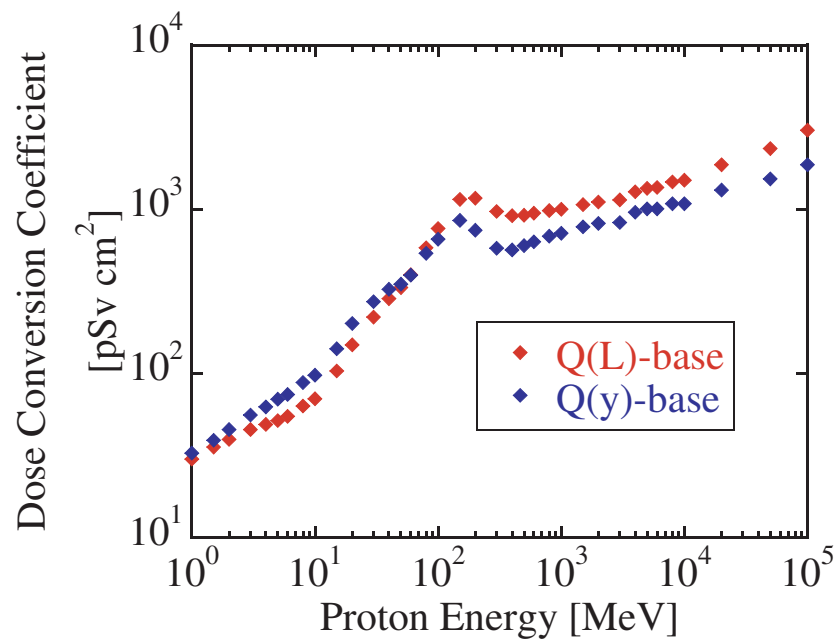


図 4.7: 陽子の $Q(L)$ ベース及び $Q(y)$ ベースの線量換算係数 [3]。

るべきであると考え。これらの換算係数を用いて、太陽活動極小期、海領域の年間線量を再評価した結果を図 4.11、図 4.12 にまとめる。図 4.11 が $Q(L)$ 線量換算係数ベースの年間線量であり、図 4.12 は $Q(y)$ 線量換算係数ベースの年間線量である。 $Q(L)$ 線量換算係数ベースの年間線量の総計は 572.1 mSv/yr であり、陽子のほかに、炭素核、酸素核、鉄核の線量寄与が目立つ。また中性子線量も全体の 8% を占め、大きなインパクトを与えている。 $Q(y)$ 線量換算係数ベースの年間線量の総計は 548.7 mSv/yr であり、 $Q(L)$ 線量換算係数ベースの年間線量より若干低い。これは特に高エネルギー領域での $Q(y)$ 線量換算係数の精度が高いことに起因している [3]。その内訳は、 $Q(y)$ 線量換算係数ベースによく似ており存在度の高い陽子の線量以外にも、炭素核、酸素核、鉄核の線量寄与が大きい。また中性子線量も全体の 9% を占める結果となった。これは月表面環境において中性子線量と陽子線量がほぼ同程度であることを示している。このような点からも、二次中性子の線量寄与の見積もりは宇宙飛行士の安全を評価する上で避けて通れない重要な要素であることが分かる。

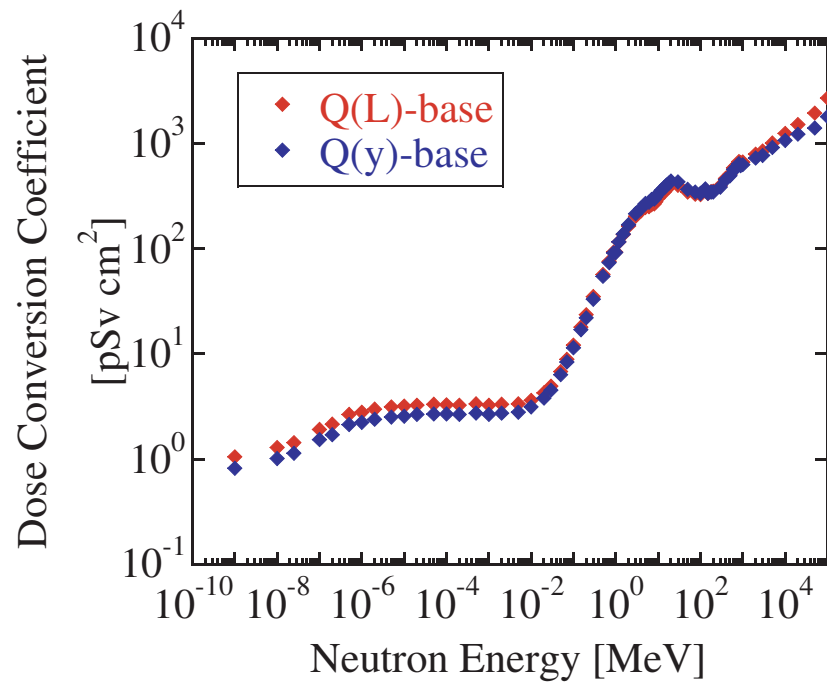


図 4.8: 中性子の $Q(L)$ ベース及び $Q(y)$ ベースの線量換算係数 [3]。

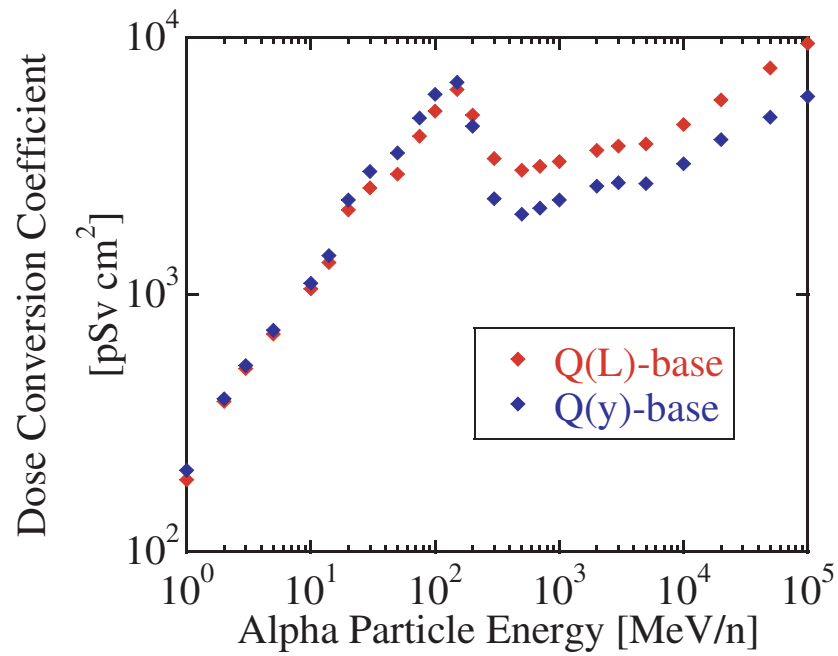


図 4.9: ヘリウム核の $Q(L)$ ベース及び $Q(y)$ ベースの線量換算係数 [9]。

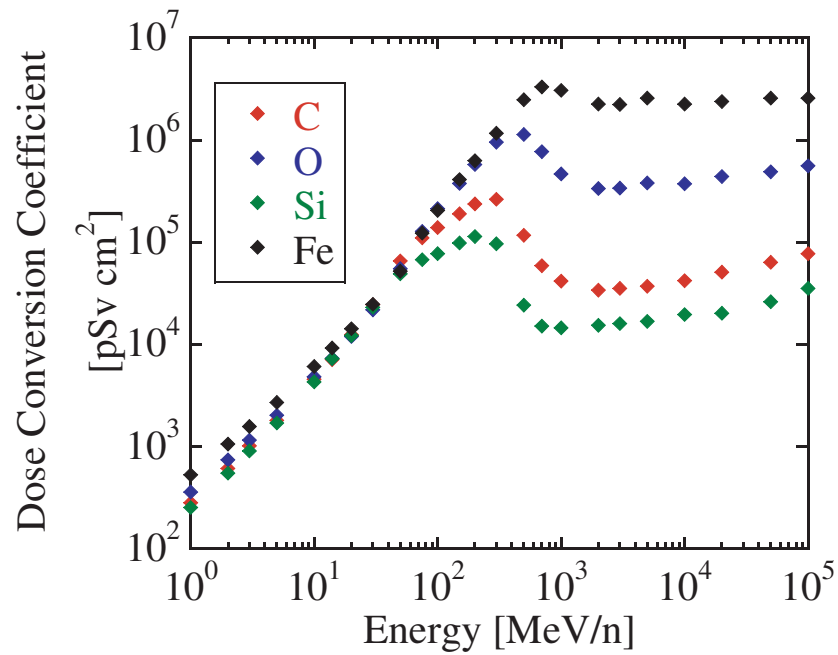


図 4.10: 炭素、酸素、ケイ素、鉄核の $Q(L)$ ベース線量換算係数 [9]。

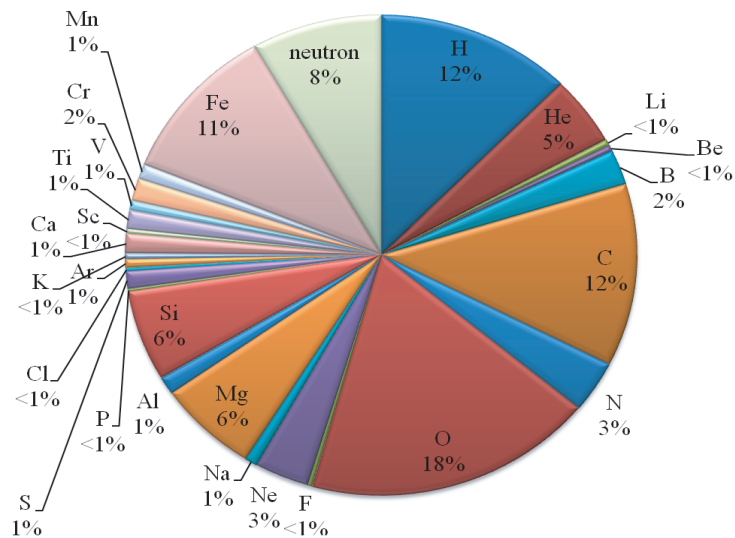


図 4.11: 太陽活動極小期、海領域のモデルにおける $Q(L)$ 線量換算係数ベースの年間線量計算結果の内訳。

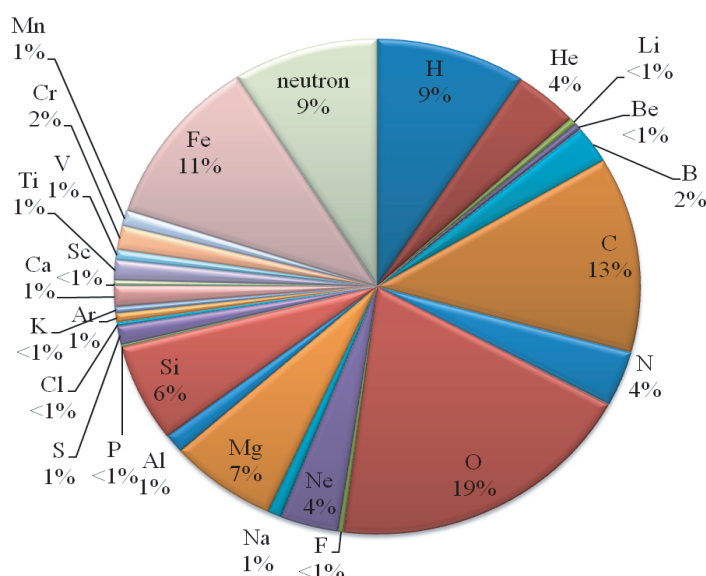


図 4.12: 太陽活動極小期、海領域のモデルにおける $Q(y)$ 線量換算係数ベースの年間線量計算結果の内訳。

4.4 線量制限との比較と有人月探査開始時期に関する提言

第1章で議論したように、長期の惑星探査計画における宇宙飛行士の線量制限は公式には定められていない。4.3章で見てきたように、各線量定義はそれぞれメリット、デメリットを含み、どの線量定義に基づき宇宙探査の線量評価を行うかということは各ミッションによって異なるかもしれない。そこで本章では地球環境において一般的な指標である実効線量制限に特化して議論することとする。

将来の月の有人探査の際、人命に最も大きな危険を与えるのは突発的な太陽フレアによって生じる大規模な太陽粒子線である。第3章で見てきたように、一度の太陽イベントが致死量に達するような線量の荷電粒子を月表面まで輸送する可能性を秘めている。このような事態を避けるために、太陽活動が比較的穏やかである太陽活動極小期の初旬に長期の月、もしくは火星探査をスタートさせるべきと考える。太陽粒子線がアルミニウムのような簡単な物質で効果的に遮蔽できることを考慮したとしても、長期ミッションの初期には十分な宇宙天気計測システムや警告システム、及び遮蔽を兼ねた簡易シェルターが存在しないことが想像できる。よって、まずはこの大規模太陽イベントを避けるような時期にミッション開始を計画すべきだ。そして、有人ミッションの初期の段階で、月の地形を生か

した地下シェルターや溶岩チューブの避難所等を完備することが望ましい。これにより、恒常的に降り注ぐ銀河宇宙線も効果的に遮蔽することが可能になる。同時に、より発達した宇宙天気の前報システムを早急に配備すべきである。太陽の大規模イベントが発生したとことを月の居住者にいち早く知らせる警報システムの完備も重要だ。これらが一体となって宇宙飛行士の安全性を確保することが最低限必要である。

また、表 1.10 で示したように、国際宇宙ステーションで業務に従事する宇宙飛行士に対して NCRP は 10 年生涯実効線量制限を推奨している [10]。その値は年齢や性別ごとに異なっているが、最も厳しい制限値として 25 歳女性宇宙飛行士に対する 400 mSv という値が示されている。同年の男性宇宙飛行士に対しての制限値は 700 mSv であり、その値は女性に比べ大きく設定されている。図 3.2 で示した年間実効線量値と NCRP 推奨の 10 年生涯実効線量制限とを比較すると、仮に太陽活動極小期に月面で遮蔽なしに 1 年間の長期ミッションを行った場合、25 歳女性、35 歳女性、25 歳男性の若い宇宙飛行士たちは生涯線量制限を超えた被曝を受けてしまうことになる。この場合、ミッションの成立性が危ぶまれる事態となるため、ミッション初期の十分な遮蔽環境が整わない時期のクルーとして、彼らは適任とは言い難い。月表面の実効線量が大変厳しく定められた定義の下で計算されていることを考慮しても、長期ミッションの最初の候補者は年齢や性別等を考慮して注意深く選ばれるべきであろう。太陽活動極大期の年間線量は最も制限値の厳しい 25 歳女性の 10 年生涯実効線量制限におさまるが、この時期は太陽の爆発現象が大量の太陽粒子線を放出する危険性をはらんでいる。図 3.10 に示したような大規模イベントが発生した場合、生涯線量制限を超えるだけでなく、急性被曝症状が現れる可能性があるため避けるべきである。

参考文献

- [1] Simpson, J. A., 1983, Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **33**, 323-381.
- [2] International Commission on Radiological Protection (2007) *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annals of ICRP 37, 2-4*, Oxford: Pergamon Press.
- [3] Sato, T., Endo, A., Zankl, M., Petoussi-Henss, N., Niita, K., 2009, Fluence-to-dose conversion coefficients for neutrons and protons calculated using the PHITS code and ICRP/ICRU adult reference computational phantoms, *Phys. Med. Biol.*, **54**, 1997-2014.
- [4] JENDLE3.3 : Japan Evaluted Nuclear Data Library, <http://www.ndc.tokai-sc.jaea.go.jp>.
- [5] Ishizaki, T., Yamashita, N., Okudaira, O., Kobayashi, S., Hirano, K., Miyachi, T., Sakurai, K., Hasebe, N., 2006, Neutron Production and Transport in the Lunar Surface, *Space Radiation*, **5**, 2, 143-156.
- [6] Rieder, R., Ecomomou, T., Wanke, H., Turkevich, A., Crisp, J., Bruckner, J., Dreibus, G., McSween, H. Y., Jr., 1997, The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode, *Science*, **278**, 1771-1774.
- [7] 松本准一, ゆり本尚義 (2008) 地球化学講座 2 宇宙・惑星化学, 倍風館.
- [8] International Commission on Radiological Protection (1991) *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21, 1-3*, Oxford: Pergamon Press.
- [9] Sato, T., Endo, Niita, K., 2010, Fluence-to-dose conversion coefficients for heavy ions calculated using the PHITS code and ICRP/ICRU adult reference computational phantoms, *Phys. Med. Biol.*, **55**, 2235-2246.

-
- [10] National Council on Radiation Protection and Measurements (2000) *Radiation Protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit*, NCRP Report No. 132, Bethesda, Maryland.
- [11] Shikaze, Y., Haino, S., Abe, K., Fuke, H., Hams, T., Kim, K. C., Makida, Y., Matsuda, S., Mitchell, J. W., Moiseev, A. A., Nishimura, J., Nozaki, M., Orito, S., Ormes, J. F., Sanuki, T., Sasaki, M., Seo, E. S., Streitmatter, R. E., Suzuki, J., Tanaka, K., Yamagami, T., Yamamoto, A., Yoshida, T., Yoshimura, T., 2007, Measurements of 0.2-20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer, *Astroparticle Phys.*, **28**, 154-167.

第5章 総括と今後の展望

本研究では、月の放射線環境を実用量である周辺線量当量、防護量である実効線量当量、実効線量の3種の線量定義に基づいて線量計算した。計算のベースとなったものは最新の宇宙線観測データである。また最新の放射線荷重係数、組織・臓器荷重係数に則した線量計算を行った。その中から明らかになった問題点を議論する中で、宇宙線の二次中性子成分や銀河宇宙線重粒子成分の重要性が明らかになった。また、既存の線量定義を比較することでそれぞれのメリット、デメリットも明らかにした。それらを踏まえて、将来の宇宙開発、月探査に向けた重要な提言を行った。

5.1 まとめ

各国が総力を挙げて月・惑星の遠隔探査を行う昨今の現状を見るに、今後、アポロ以来の新たな月の有人探査が実施されることは間違いない。しかし、特に放射線防護の観点に焦点を絞ると、アポロ時代から宇宙飛行士の安全性の評価はほとんど進んでいない。近年、新たに最新鋭の宇宙線観測機器が次々と新しいデータを更新し、また放射線を取り扱うためのモンテカルロコードはアポロ探査の時代に比べ大きく改良されてきている。それらを使用することで、アポロ時代よりもさらに踏み込んだ月・惑星の放射線環境の評価を行い、将来の長期にわたる有人ミッションを安全に遂行する必要がある。

本研究は最新の宇宙線観測データと改良されたシミュレーションコードを用い、月の放射線環境の評価を行った。特に、長期にわたる将来の有人宇宙探査に際しては、宇宙飛行士の線量制限の規定が正式に定まっていただけでなく、どのような線量定義に基づいて安全評価を行うかということすら決定されていないのが現状である。そこで、本研究では数ある放射線量定義の中から特に人体被曝に特化して、実用量である周辺線量当量と、防護量である実効線量当量、実効線量を選択し、計算した。ワーストケースである太陽活動極小値の月の海領域における各線量値は周辺線量当量で約 780 mSv/yr、実効線量当量で約 370 mSv/yr、実効線量で約 890 mSv/yr であった。月の表面環境及び月地下の線量計算の結果、以下のような重要な知見を得た。

- 銀河宇宙線においては存在度の高い宇宙線陽子だけでなく、存在度の低い宇宙線重粒子や二次成分である中性子成分も無視できないほどの線量寄与をもたらす。
- 太陽の突発的な爆発現象によって放出される太陽粒子線は、エネルギースペクトルや放出粒子がイベントごとに様々ではあるが、特に大きなイベントが発生した場合、月表面の放射線環境を一変させ年間の銀河宇宙線線量を超える線量値となる。
- 大規模な太陽粒子線に対しても 10 g/cm^2 程度のアルミニウムシールドで効果的に遮蔽できる。
- 銀河宇宙線は高エネルギー成分にも高いフルエンスを持つため簡単に遮蔽することはできないが、月物質を約 500 g/cm^2 使って月地下にシェルターを造ることで二次中性子成分を含め、十分に遮蔽が可能である。
- 地球上では実用量は防護量のよい近似値として利用されるが、宇宙環境では低透過率の荷電粒子が高フラックスで存在し、またその粒子種も多く、エネ

ルギー領域も広いため、これは成り立たない。

以上のことを踏まえ、今後計画されるであろう将来の月有人探査やそのための線量評価に対して、次のような提言を行った。

- 銀河宇宙線重粒子成分の重要性を加味し、今後はより長期の宇宙線重粒子成分のエネルギースペクトル計測を行い、太陽活動に伴う変動等も観測すべきである。
- 月居住者は二次中性子及び宇宙線荷電粒子重粒子成分まで高精度で測ることが可能な線量計を携帯する必要がある。
- 長期にわたる月・惑星探査は大規模太陽フレアを避けて太陽活動極小期の初期に開始されるのが望ましい。
- 安全に有人探査を遂行するためには、宇宙天気予報システムや太陽イベントに対する警告システム、及び十分な遮蔽設備を備えたシェルターが必要であるが、それらが完備される前の有人探査においては、月の溶岩チューブなど月の地形をいかした自然のシェルターを居住場として活用すべきである。

本研究では地球とは異なる月の過酷な放射線環境に焦点を当て、今後の有人月探査を念頭に置いて線量計算を行った。将来、我が国が有人探査のガイドラインを作成するにあたりひとつの指標となる結果をここに示すことができた。

5.2 今後の展望

本研究は計算を主体として月の放射線環境の評価を行うものであった。今後は地上での実験を通して本研究で得られた結果を検証していくことが必要である。同時にこのような環境で効果的に作動する線量計の開発が必要である。しかし、月の放射線環境はたいへん複雑で、地球の加速器実験でその環境を再現することは大変難しいことが予想される。恒常的に月に降り注ぐ銀河宇宙線荷電粒子は陽子のような軽い粒子から鉄核のような重粒子までさまざまである。これらの粒子が10 MeV/n から数100 GeV/n というたいへん広い領域にわたるエネルギースペクトルとして存在する。実験にはこのようなエネルギースペクトルを再現できるような加速器環境が必要となる。また2007年に打ち上げられたインドの月探査衛星 Chandrayaan-1 [1] と2009年に打ち上げられたアメリカの月探査衛星 LRO [2] はそれぞれ月の線量を測ることを目的とした線量計を積んでいる。これらの解析結果が待たれる。

月表面のように特殊な放射線環境で動作する線量計の開発は今後最も重要な課題の一つとなる。人体への放射線の影響を再現するために、これらは人体組織透過物質で作られることが望ましい。ガスを用いた線量計では、実質的に皮膚表面ほどの厚さに対応する線量しか測ることはできないため、人体の臓器などに付与するエネルギーを測るのには適さないかもしれない。しかし、MATROSHKA 実験 [3] のように、表面素材や線量計の壁などにも組織透過物質を使って実際の人体を模擬した線量計を使用すれば、体内で作られる二次粒子の寄与までを考慮した線量計測ができる。実際の長期にわたる宇宙探査に先駆けて、このような人体模型を用いた組織透過物質による線量計測が重要である。

また、実際に月居住者が月環境で線量管理を行う場合は、小型で軽量かつ、リアルタイム測定が可能な個人線量計が必要になる。十分持ち運びが可能な大きさで、かつ様々な種類の放射線に対応し、重粒子の弁別も行えることが望ましい。同時に宇宙線のエネルギースペクトルを十分カバーできるような、広いエネルギー領域で検出可能な線量計が必要だ。太陽粒子線のような高フルエンスの粒子も十分に測れる工夫が必要であるだけでなく、荷電粒子のような低透過率の粒子と二次中性子のような高透過率な粒子双方に対応した線量計が必要になるだろう。

また、本研究は月の組成に着目して場所による線量値の違いを見積もったが、地形による線量値の違いも研究課題の一つとして残される。クレーターの底やリム、または巨大なホールなど、月には様々な面白い地形がある。これらの特殊なスポットごとに線量を計算し、また実際に測定することで、きめ細かな線量評価をする必要がある。

アポロ探査以降、地球低軌道高度に制限されてきた人類の宇宙における活動は、今まさにその探査領域を飛躍的に拡大させる局面に立っている。地球とは異なる過酷な放射線環境を持つ月において安全に探査や居住を行うためには、放射線そのものと放射線の人に対する影響について、また放射線防護の方法について、正しい基礎知識を身につけることが必要である。本研究では、最新の宇宙線観測データをもとに、月の放射線環境の再評価を行った。また、線量定義の比較を行うことで現状の宇宙における線量評価の問題点を示すことができた。特に本論文で強調した線量定義の統一やガイドラインの作成は今後、国際社会の協力の下で宇宙開発を進める上では非常に重要な意味を持つ。現在のように、国や機関によって線量評価の基準や換算係数が異なると、宇宙開発を急ぐあまり放射線防護の面が軽視されてしまう可能性や、逆に放射線障害の可能性を不当に過大評価して、宇宙における人類活動の拡大に消極的になってしまう可能性がある。

人類が永続的に繁栄し続けるという点で、宇宙は重要であり、人類の夢と希望である。宇宙環境における科学の推進と宇宙の利用に向けて、適切な放射線環境の把握と防護の理解、実施は今後の宇宙開発においてますます重要な課題となる

だろう。

参考文献

- [1] Goswamia, J. N, and Annaduraib, M., 2008, Chandrayaan-1 mission to the Moon, *Acta Astron.*, **63**, 1215-1220.
- [2] Chin, G., Brylow, S., Foote, M., Garvin, J, Kasper, J., Keller, J., Litvak, M., Mitrofanov, I., Paige, D., Raney, K., Robinson, M., Sanin, A., Smith, D., Spence, H., Spudis, P., Stern, S. A., Zuber, M., 2007, Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission, *Space Sci. Rev.*, **129**, 4, 391-419.
- [3] Reitz G., 2010, Radiation dose assessment in space missions The MATROSHKA Experiment, *Radiological Sciences*, **53**, 8-27.

Appendix

GLOSSARY

- Absorbed dose, D

The fundamental dose quantity given by

$$D = dm/d\epsilon$$

where $d\epsilon$ is the mean energy imparted to matter of mass dm by ionising radiation. The SI unit for absorbed dose is joule per kilogram (J kg^{-1}) and its special name is gray (Gy).

- Activity, A

The expectation value of the number of nuclear transformations occurring in a given quantity of material per unit time. The SI unit of activity is per second (s^{-1}) and its special name is becquerel (Bq).

- Ambient dose equivalent, $H^*(10)$

The dose equivalent at a point in a radiation field that would be produced by the corresponding expanded and aligned field in the ICRU sphere at a depth of 10 mm on the radius vector opposing the direction of the aligned field. The unit of ambient dose equivalent is joule per kilogram (J kg^{-1}) and its special name is sievert (Sv).

- Becquerel (Bq)

The special name for the SI unit of activity, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ ($\approx 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$).

- Dose equivalent, H

The product of D and Q at a point in tissue, where D is the absorbed dose and Q is the quality factor for the specific radiation at this point, thus:

$$H = DQ$$

The unit of dose equivalent is joule per kilogram (J kg^{-1}), and its special name is sievert (Sv).

- Dose limit

The value of the effective dose or the equivalent dose to individuals from planned exposure situations that shall not be exceeded.

- Effective dose, E

The tissue-weighted sum of the equivalent doses in all specified tissues and organs of the body, given by the expression:

$$E = \sum_{\text{T}} w_{\text{T}} \sum_{\text{R}} w_{\text{R}} D_{\text{T,R}} \text{ or } E = \sum_{\text{T}} w_{\text{T}} H_{\text{T}}$$

where H_{T} or $w_{\text{R}} D_{\text{T,R}}$ is the equivalent dose in a tissue or organ, T, and w_{T} is the tissue weighting factor. The unit for the effective dose is the same as for absorbed dose, J kg^{-1} , and its special name is sievert (Sv).

- Emergency

A non-routine situation or event that necessitates prompt action primarily to mitigate a hazard or adverse consequences for human health and safety, quality of life, property or the environment. This includes situations for which prompt action is warranted to mitigate the effects of a perceived hazard.

- Emergency exposure situation

An unexpected situation that occurs during the operation of a practice, requiring urgent action. Emergency exposure situations may arise from practices.

- Equivalent dose, H_T

The dose in a tissue or organ T given by:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

where $D_{T,R}$ is the mean absorbed dose from radiation R in a tissue or organ T, and w_R is the radiation weighting factor. Since w_R is dimensionless, the unit for the equivalent dose is the same as for absorbed dose, J kg^{-1} , and its special name is sievert (Sv).

- Fluence (particle fluence), F

The quotient of dN by da , where dN is the number of particles incident upon a small sphere of cross-sectional area da , thus:

$$F = dN/da$$

- Gray (Gy)

The special name for the SI unit of absorbed dose: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$.

- LD50

Dose that is lethal for half of the exposed individuals.

- Linear energy transfer (L or LET)

The average linear rate of energy loss of charged particle radiation in a medium, i.e., the radiation energy lost per unit length of path through a material. That is, the quotient of dE by dl where dE is the mean energy lost by a charged particle owing to collisions with electrons in traversing a distance dl in matter.

$$L = dE/dl$$

The unit of L is J m^{-1} , often given in $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$.

- Medical exposure

Exposure incurred by patients as part of their own medical or dental diagnosis or treatment; by persons, other than those occupationally exposed, knowingly, while voluntarily helping in the support and comfort of patients; and by volunteers in a programme of biomedical research involving their exposure.

- NORM (naturally occurring radioactive material)

Radioactive material containing no significant amounts of radionuclides other than naturally occurring radionuclides. Material in which the activity concentrations of the naturally occurring radionuclides have been changed by some process are included in NORM.

- Occupational exposure

This refers to all exposure incurred by workers in the course of their work, with the exception of 1) excluded exposures and exposures from exempt activities involving radiation or exempt sources; 2) any medical exposure; and 3) the normal local natural background radiation.

- Operational quantities

Quantities used in practical applications for monitoring and investigating situations involving external exposure. They are defined for measurements and assessment of doses in the body. In internal dosimetry, no operational dose quantities have been defined which directly provide an assessment of equivalent or effective dose. Different methods are applied to assess the equivalent or effective dose due to radionuclides in the human body. They are mostly based on various activity measurements and the application of biokinetic models (computational models).

- Personal dose equivalent, $H_p(d)$

An operational quantity: the dose equivalent in soft tissue (commonly interpreted as the 'ICRU sphere') at an appropriate depth,

d , below a specified point on the human body. The unit of personal dose equivalent is joule per kilogram (J kg^{-1}) and its special name is sievert (Sv). The specified point is usually given by the position where the individual's dosimeter is worn.

- Protection quantities

Dose quantities that the Commission has developed for radiological protection that allow quantification of the extent of exposure of the human body to ionising radiation from both whole and partial body external irradiation and from intakes of radionuclides.

- Public exposure

Exposure incurred by members of the public from radiation sources, excluding any occupational or medical exposure and the normal local natural background radiation.

- Quality factor, $Q(L)$

The factor characterising the biological effectiveness of a radiation, based on the ionisation density along the tracks of charged particles in tissue. Q is defined as a function of the unrestricted linear energy transfer, L_∞ (often denoted as L or LET), of charged particles in water:

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & (L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ 0.32L - 2.2 & (10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ 300/\sqrt{L} & (L > 100 \text{ keV}/\mu\text{m}) \end{cases}$$

Q has been superseded by the radiation weighting factor in the definition of equivalent dose, but it is still used in calculating the operational dose equivalent quantities used in monitoring.

- Radiation weighting factor, w_R

A dimensionless factor by which the organ or tissue absorbed dose is multiplied to reflect the higher biological effectiveness of high-LET radiations compared with low-LET radiations. It is used to derive the equivalent dose from the absorbed dose averaged over a tissue or organ.

- Sievert (Sv)

The special name for the SI unit of equivalent dose, effective dose, and operational dose quantities. The unit is joule per kilogram (J kg^{-1}).

- Tissue weighting factor, w_T

The factor by which the equivalent dose in a tissue or organ T is weighted to represent the relative contribution of that tissue or organ to the total health detriment resulting from uniform irradiation of the body. It is weighted such that:

$$\sum_T w_T = 1$$

謝辞

本研究は著者が早稲田大学先進理工学研究科在学中に 2006 年から 2011 年にかけてなされたものです。指導教官である早稲田大学理工学術院総合研究所、長谷部信行教授に終始ご懇切なご指導を賜り、本論文を作成することができました。心より感謝いたします。また、早稲田大学長谷部研究室の桜井邦朋教授には本研究の全般にわたりたくさんのご指導、ご助言をいただきました。スウェーデンはチャルマース大学の Lembit Sihver 教授には PHITS をはじめとするモンテカルロコードや遮蔽物質に対する様々な知識をご教授いただきました。また埼玉県立大学の柴村英道教授には周辺線量当量計算に必要な阻止能算出プログラムをご提供いただきました。JAXA 宇宙開発機構の込山立人研究員には実効線量当量計算に必要な換算係数をご提供いただきました。早稲田大学理工学研究所の鷲尾方一教授、元福井大学の宮島光弘教授、放射線医学総合研究所の内堀幸夫教授には本論文の作成に際し、多くの有意義なご助言を賜りました。深く感謝いたします。

本研究は、早稲田大学理工学術院総合研究所・長谷部研究室の先生方、先輩、後輩の方々のご指導、ご協力があって遂行することができたものです。特に現在、宇宙開発航空機構でご活躍されておられる晴山慎先生には宇宙線に関するご指導を、唐牛譲先生には月地殻の組成に関するご指導をいただきました。現在、放射線医学総合研究所にてご活躍中の小林進悟先生には放射線の一般知識と線量の基本概念をご指導いただきました。そして、現在アメリカの Planetary Science Institute にてご活躍中の山下直之先生には Geant4 の使用方法をご指導いただくと共に、断面積ライブラリの改訂バージョンをご提供いただきました。ありがとうございました。本研究を支えてくれた皆さまに感謝いたします。

研究業績

学術誌論文・査読付 Proceedings

1. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: “Radiation Doses for Human Exposed to Galactic Cosmic Rays and Their Secondary Products on the Lunar Surface”, *Biol. Sci. Space*, **22**, 2 (2008) 59-66.
2. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: “HZE Particle and Neutron Dosages from Cosmic Rays on the Lunar Surface”, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A*, **78**, (2009) 149-152.
3. K. Hayatsu, K. Sakurai, N. Hasebe: “TSimulation Calculation of the Lunar Radiation Environment Due to Galactic Cosmic Rays and Their Secondary Particles”, accepted to SUM 2010.
4. S. Kobayashi, N. Hasebe, E. Shibamura, O. Okudaira, M. Kobayashi, N. Yamashita, Y. Karouji, M. Hareyama, K. Hayatsu, C. d’Uston, S. Maurice, O. Gasnault, O. Forni, B. Diez, R. C. Reedy, and K. J. Kim “Determining the Absolute Abundances of Natural Radioactive Elements on the Lunar Surface by the Kaguya Gamma-ray Spectrometer”, *Space Sci. Rev.*, **154** (2010) 193-218.
5. N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M. -N. Kobayashi, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kodaira, S. Komatsu, K. Hayatsu, K. Iwabuchi, S. Nemoto, K. Sakurai, M. Miyajima, M. Ebihara, T. Hihara, T. Arai, T. Sugihara, H. Takeda, C. d’Uston, O. Gasnault, B. Diez, O. Forni, S. Maurice, R.C. Reedy, K.J. Kim: “First Results of High Performance Ge Gamma-Ray Spectrometer Onboard Lunar Orbiter SELENE (KAGUYA)”, *J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A*, **78**, (2009) 18-25.

6. N. Yamashita, N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M. Kobayashi, O. Okudaira, S. Kobayashi, M. Hareyama, Y. Karouji, S. Kodaira, K. Sakurai, K. Iwabuchi, K. Hayatsu, S. Nemoto, M. Ebihara, T. Hihara, C. d'Uston, S. Maurice, O. Gasnault, O. Forni, B. Diez, R. C. Reedy, K. J. Kim: "Germanium Gamma-Ray Spectrometer on SELENE (KAGUYA)", J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. A, **78**, (2009) 153-156.
7. Y. Karouji, N. Hasebe, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, M. Hareyama, T. Miyachi, K. Satoh, K. Iwabuchi, K. Hayatsu, S. Nemoto, Y. Takeda, K. Tsukada, H. Nagaoka: "Distribution of K, Th and U Concentration on the Moon: The Initial Observation by SELENE GRS", Advance in Geosciences, **19**, (2008) 43-55.
8. N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, S. Komatsu, K. Hayatsu, S. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, J. Machida, O. Okudaira, K. Sakurai: "Lunar Gamma-ray Observation by Kaguya GRS", Advance in Geosciences, **19**, (2008) 57-67.
9. Y. Takeda, K. Hayatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Hasebe: "The ambient dose equivalent from lunar gamma-ray observed by Kaguya gamma-ray spectrometer", Advance in Geosciences, **19**, (2008) 69-88.
10. N. Hasebe, Y. Karouji, O. Okudaira, K. Hayatsu, Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, J. Machida, S. Sakurai, S. Komatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, T. Okada, E. Shibamura, M. -N. Kobayashi, N. Yamashita, C. d'Uston, O. Gasnault, O. Forni, S. Maurice, K. Kim, R. C. Reedy, J. M. Dohm: "Global Distributions of K, Th and U on the Moon Observed by Kaguya GRS", New Advances in Lunar Exploration", Proc. of International Symposium on Lunar Science ISLS2010 (2010) 42-49.

査読なし Proceedings・報告書・寄稿

1. N. Hasebe, N. Yamashita, Y. Karouji, S. Kobayashi, M. Hareyama, K. Hayatsu, S. Nemoto, K. Iwabuchi, Y. Takeda, H. Nagaoka, K. Tsukada, O. Okudaira, S. Sakurai, S. Komatsu, E. Shibamura, M. -N. Kobayashi, M. Ebihara, T. Hihara, T. Arai, T. Sugihara, H. Takeda, C. d 'Uston, O. Gasnault, B. Diez, O. Forni, S. Maurice, R. C. Reedy and K. Kim: "Overview of Elemental Distributions on the Moon Observed by SELENE GRS", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2009-o-3-10v.
2. K. Hayatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: "Radiation Dose Estimated in the Lunar Environment", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2008-p-08.
3. N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M.-N. Kobayashi, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kodaira, S. Komatsu, K. Hayatsu, K. Iwabuchi, S. Nemoto, K. Sakurai, M. Miyajima, M. Ebihara, T. Hihara, T. Arai, T. Sugihara, H. Takeda, C. d 'Uston, O. Gasnault, B. Diez, O. Forni, S. Maurice, R. C. Reedy: "High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer On Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA)", International Symposium on Space Technology and Science, ISTS Web Paper Archives, 2008-k-41.
4. K. Hayatsu, S. Kobayashi, N. Hareyama, N. Yamashita, M. Miyajima, N. Hasebe: "Environmental Radiation Dose on the Moon", Proc. of 10th Int. Conf. on Adv. Tech. and Particle Phys., Index of /ICATPP10th_2007/Software Applications, 05-Nov-2007.
5. K. Hayatsu, S. Kobayashi, N. Yamashita, O. Okudaira, K. Ishizaki, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Sakurai, N. Hasebe: "Dose Equivalent on the Lunar Surface", Space Radiation, **5**, 2 (2006) 177-187.
6. 長谷部信行, 早津佳那子: "宇宙の放射線環境", 科学 Science Journal KAGAKU, **81**, 2 (2011) 159.
7. 早津佳那子, 小林進悟, 晴山慎, 山下直之, 長谷部信行: "銀河宇宙線による月面の線量", 宇宙環境利用科学委員会「月面における人類の活動に向けた線量計測」第一回会合報告書 (2008) 82-88.

8. 早津佳那子: “銀河宇宙線を中心とした月の線量”, 平成 20 年度 STE 研究集会「太陽圏シンポジウム」報告書 (2009) 23-25.
9. N. Hasebe, K. Hayatsu: “Radiation Environment on the Moon”, Radiological Science, **53**, 8・9 (2010) 28-33.

国際会議発表

1. K. Hayatsu, S. Kobayashi, N. Hareyama, N. Yamashita, M. Miyajima, N. Hasebe: “Environmental Radiation Dose on the Moon”, 10th Int. Conf. on Adv. Tech. and Particle Phys., Como, Italy, 10/8-12, 2007.
2. K. Hayatsu, S. Kobayashi, M. Hareyama, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: “Radiation dose Estimated in the Lunar Environment”, The 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, Japan, 6/1-8, 2008.
3. K. Hayatsu, M. Hareyama, N. Hasebe, S. Kobayashi, N. Yamashita: “Dose equivalent on the Moon contributed from cosmic rays and their secondary particles”, The 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, 7/13-20, 2008.
4. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: “Radiation Dose Equivalent on the Moon”, Asia Oceania Geosciences Society 2008, Busan, Korea, 6/16-20, 2008.
5. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, N. Hasebe: “HZE Particle and Neutron Dosages from Galactic Cosmic Rays on the Lunar Surface”, International Workshop on Advances in Cosmic Ray Science, 3/17-19, 2008.
6. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Yamashita, K. Sakurai, K. J. Kim, N. Hasebe: “Radiation Environment Concerned with Human Activity on the Moon”, Asia Oceania Geosciences Society 2009, Singapore, 8/11-15, 2009.
7. K. Hayatsu, M. Hareyama, S. Kobayashi, Y. Karouji, K. Sakurai, L. Sihver, N. Hasebe: “Effective Dose Equivalent due to Cosmic Ray Particles and Their Secondary Particles on the Moon”, The 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 7/18-25, 2010.
8. K. Hayatsu, Y. Takeda, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kobayashi, N. Hasebe: “Global Map of Lunar Effective Dose Equivalents Observed by Kaguya Gamma-Ray Spectrometer”, The 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 7/18-25, 2010.

-
9. K. Hayatsu, Y. Karouji, L. Sihver, N. Hasebe: “Lunar Radiation Dose due to Cosmic Rays and Their Secondary Particles”, 61st International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, 9/27-10/1, 2010.
 10. K. Hayatsu, K. Sakurai, N. Hasebe.: “Radiation Environment on the Moon Evaluated by the Effective Dose”, International Symposium on Remote Sensing 2011, Yeosu, Korea, 11/1-4, 2011.

国内会議発表・ワークショップ等

1. 早津佳那子, 小林進悟, 山下直之, 奥平治, 石崎健士, 宮地孝, 宮島光弘, 桜井邦朋, 長谷部信行: “月の放射線環境と線量の評価”, 研究会「第 21 回 放射線検出器とその応用」, 2007 年 2 月 1 日～3 日, 高エネルギー加速器研究機構.
2. 早津佳那子, 小林進悟, 山下直之, 奥平治, 石崎健士, 宮地孝, 宮島光弘, 桜井邦朋, 長谷部信行: “Radiation Environment on the Lunar Surface Estimated in Dose Equivalent”, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 19 日～24 日, 幕張メッセ.
3. 早津佳那子, 晴山慎, 小林進悟, 山下直之, 宮島光弘, 桜井邦朋, 長谷部信行: “銀河宇宙線による月表面の線量評価”, 研究会「第 22 回 放射線検出器とその応用」, 2008 年 2 月 5 日～7 日, 高エネルギー加速器研究機構.
4. 早津佳那子, 晴山慎, 小林進悟, 山下直之, 宮島光弘, 桜井邦朋, 長谷部信行: “宇宙粒子線による月表面の線量評価”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 27 日～30 日, 日本大学.
5. 早津佳那子: “銀河宇宙線を中心とした月の線量”, 平成 20 年度 STE 研究集会「太陽圏シンポジウム」, 2009 年 1 月 26 日～28 日, 名古屋大学.
6. 早津佳那子, 晴山慎, 小林進悟, 山下直之, 宮島光弘, 桜井邦朋, 長谷部信行: “宇宙線とその二次粒子による月の実効線量当量の評価”, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 30 日～4 月 2 日, 筑波大学.